

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерні технології і системи»

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

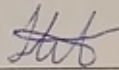
Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

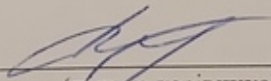
на тему: Підвищення пропускнуої здатності залізничної ділянки шляхом
впровадження цифрового радіоканалу та технології віртуальних блок-ділянок

за освітньою програмою «Автоматика та автоматизація на транспорті»
зі спеціальності: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

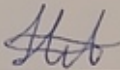
Виконав: студент групи АТ2321 (967М)


_____ / Андрій НУДЬГА /
(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 – 2025 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: Increasing the throughput capacity of railway section by
implementation the digital radio channel and technology of virtual block sections

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

in the Specialty: 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics

Done by the student of the group AT2321 (967M)

/ Andrii NUDHA /

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: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

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)

студенту Нудьга Андрію Володимировичу
(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: Підвищення пропускну здатності залізничної ділянки шляхом впровадження цифрового радіоканалу та технології віртуальних блок-ділянок

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

затверджені наказом від "05" жовтня 2023 р. № 991ст

2. Строк подання студентом роботи: 06.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: принципи побудови та технічні характеристики систем цифрового радіозв'язку TETRA, GSM-R, FRMCS

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

4.1 Аналітична частина: виконати аналітичний огляд існуючих систем

цифрового залізничного радіозв'язку. 4.2 Основна частина: 1) розробити

структуру та загальні принципи функціонування вітчизняної системи

інтервального регулювання з віртуальними блок-ділянками; 2) визначити

пропускну здатність СІРРП з віртуальними блок-ділянками; 3) виконати

імітаційне моделювання базової станції мобільного зв'язку

5. Перелік графічного матеріалу:

Структурна схема та блок-схема алгоритму роботи системи інтервального

регулювання з віртуальними блок-ділянками, графічні залежності, отримані

в результаті моделювання та розрахунків

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд існуючих систем цифрового радіозв'язку для залізничного транспорту	06.05.2024	
2	Розробка структури та загальних принципів функціонування вітчизняної системи інтервального регулювання на базі цифрового радіозв'язку	01.07.2024	
3	Визначення пропускну здатності системи інтервального регулювання з віртуальними блок-ділянками	28.10.2024	
4	Імітаційне моделювання базової станції мобільного зв'язку як пріоритетної системи масового обслуговування	23.12.2024	
5	Оформлення кваліфікаційної роботи	06.01.2025	
6	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	13.01.2025	
7	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	20.01.2025 – 24.01.2025	

Студент

_____ (підпис)

Андрій НУДЬГА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Костянтин ГОНЧАРОВ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

67 сторінок, 25 рисунків, 2 таблиці, 19 джерел літератури, 2 додатки.

Об'єкт розробки – система інтервального регулювання руху поїздів на базі цифрового радіозв'язку.

Мета роботи – підвищення пропускної здатності залізничних ділянок шляхом впровадження цифрового радіоканалу та технології віртуальних блок-ділянок.

Методи дослідження – аналіз існуючих технічних рішень, методи розробки алгоритмів роботи та програмного забезпечення, методи теорії масового обслуговування, методи статистичного моделювання.

У першому розділі роботи проаналізовані існуючі вітчизняні та закордонні системи цифрового радіозв'язку для залізниці, розглянуто нові рішення, які активно розвиваються за кордоном. Зокрема аналізується нова система Future Railway Mobile Communication System (FRMCS), яка розробляється для заміни застарілого стандарту GSM-R. В другому розділі запропонована структурна схема та алгоритм роботи системи інтервального регулювання рухом поїздів на базі цифрового зв'язку, яка враховує особливості вітчизняних систем залізничної автоматики. В третій частині проведені розрахунки та порівняльний аналіз пропускної здатності перегону при використанні трьох, чотирьохзначного автоблокування, а також систем інтервального регулювання з рухливими блок-ділянками. Четвертий розділ присвячений розробці імітаційної моделі базової станції системи цифрового залізничного радіозв'язку як пріоритетної системи масового обслуговування.

Висновок. Впровадження запропонованої системи інтервального регулювання на базі цифрового радіоканалу з віртуальними блок-ділянками дозволить суттєво підвищити пропускну здатність залізничних ліній та підвищити безпеку руху.

Ключові слова: СИСТЕМА ІНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РУХОМ ПОЇЗДІВ, ВІРТУАЛЬНІ БЛОК-ДІЛЯНКИ, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, FRMCS, БАЗОВА СТАНЦІЯ, СИСТЕМА МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ЦИФРОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ	9
1.1 Призначення та різновиди систем залізничного радіозв'язку	9
1.2 Особливості, структура та технічні характеристики системи транкінгового радіозв'язку TETRA.	11
1.3 Система цифрового радіозв'язку для залізничного транспорту GSM-R	14
1.3.1 Особливості, структура та технічні характеристики системи GSM-R	14
1.3.2 Застосування технології GSM-R в системі ERTMS	21
1.4 Особливості системи залізничного радіозв'язку FRMCS	23
1.5 Висновки за розділом	26
РОЗДІЛ 2 СТРУКТУРА ТА ПРИНЦИП ДІЇ СИСТЕМИ ІНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З ВІРТУАЛЬНИМИ БЛОК-ДІЛЯНКАМИ	27
2.1 Структура системи інтервального регулювання рухом поїздів з віртуальними блок-ділянками	27
2.2 Структура локомотивної системи безпеки	30
2.3 Алгоритм роботи локомотивної системи безпеки	31
2.4 Висновки за розділом	33
РОЗДІЛ 3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ПЕРЕГОНУ ДЛЯ РІЗНИХ СИСТЕМ ІНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ	34
3.1 Пропускна здатність перегону при застосовуванні тризначного та чотиризначного автоблокування	34
3.2 Пропускна здатність перегону при застосування координатної системи інтервального регулювання	36
3.3 Система інтервального регулювання з віртуальними блок-ділянками	43
3.4 Висновки за розділом	45
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ СИСТЕМИ ЦИФРОВОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ	46

4.1 Представлення базової станції мобільного зв'язку як системи масового обслуговування	46
4.2 Розрахунок кількості каналів базової станції FRMCS	48
4.3 Моделювання базової станції без пріоритетності викликів	50
4.4 Моделювання базової станції з пріоритетністю викликів	54
4.5 Висновки за розділом	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	62
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	63
ДОДАТКИ	65

ВСТУП

Сучасні залізничні перевезення вимагають постійного підвищення ефективності та безпеки. Одним із ключових аспектів цього є системи інтервального регулювання руху поїздів (СІРПП), які забезпечують безпечний і безперебійний рух поїздів. Традиційні СІРПП використовують фіксовані блок-ділянки, довжина яких визначається найгіршим сценарієм гальмування поїзда. Це призводить до обмеження пропускної здатності лінії, оскільки для всіх поїздів встановлюється однакова відстань між ними.

Останнім часом з'явилися нові підходи до організації руху поїздів, засновані на використанні цифрового радіозв'язку. Такі системи, як ERTMS та CTCС, дозволяють динамічно змінювати довжину блок-ділянок залежно від реальних умов руху кожного поїзда. Це дозволяє значно підвищити пропускну здатність лінії. Однак, повна відмова від фізичних блок-ділянок і повна залежність від цифрового зв'язку створює певні ризики для безпеки руху.

У зв'язку з цим, перспективним напрямком розвитку СІРПП є гібридні системи, які поєднують в собі переваги традиційних і нових підходів. В таких системах використовуються як фізичні, так і віртуальні блок-ділянки. Фізичні блок-ділянки забезпечують базовий рівень безпеки, а віртуальні дозволяють гнучко адаптувати систему до змінних умов руху.

Метою даної роботи є дослідження можливостей впровадження гібридних систем інтервального регулювання руху поїздів на вітчизняних залізницях. Буде проведений аналіз існуючих систем, розроблені математичні моделі для оцінки ефективності різних варіантів організації руху, а також розроблені рекомендації щодо впровадження гібридних систем.

Результати даного дослідження дозволять підвищити пропускну здатність залізничних ліній, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити більш безпечний і комфортний рух пасажирів і вантажів.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ЦИФРОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

1.1 Призначення та різновиди систем залізничного радіозв'язку

Системи залізничного радіозв'язку забезпечують ефективність керування залізничним транспортом та підвищення безпеки руху поїздів. Початком розвитку радіозв'язку в Україні вважається 1947 рік.

За технологічними ознаками розрізняють наступні види залізничного радіозв'язку: поїзний радіозв'язок (ПРЗ), ремонтно-оперативний радіозв'язок (РОРЗ) та станційний радіозв'язок (СРЗ). Для кожного виду була створена своя конструкція, набір користувачів та специфікація використання. Класифікація цих трьох систем наведена на рис. 1.1 [1].



Рисунок 1.1 – Систематизація видів залізничного радіозв'язку

де СРЗ-МГ – мережі маневрового і гіркового радіозв'язку

СРЗ-Т – мережі технологічних абонентів

СРЗ-У – мережі управління на великих залізничних станціях і вузлах

ПРЗ-Л – лінійні мережі поїзного радіозв'язку

ПРЗ-З – зонні мережі поїзного радіозв'язку

ПРЗ-СП – мережі службового пасажирського радіозв'язку

РОРЗ-В – внутрішні мережі в зоні виконання робіт

РОРЗ-Л – лінійні мережі ремонтно – оперативного радіозв'язку

РОРЗ-Т – мережі технологічного оперативного радіозв'язку

Система поїзного радіозв'язку забезпечує комунікацію між різними учасниками руху поїзда. Вона складається з кількох видів мереж: лінійні мережі (ПРЗ-Л) призначені для зв'язку між диспетчером і машиністами локомотивів протягом всієї диспетчерської дільниці; зонні мережі (ПРЗ-З) забезпечують зв'язок машиніста з персоналом станцій, який бере участь в обслуговуванні поїзда; мережі службового пасажирського радіозв'язку (ПРЗ-СП) начальника поїзда призначені для комунікації начальника поїзда з машиністом та іншими службами, пов'язаними з обслуговуванням пасажирів.

Станційний радіозв'язок є невід'ємною частиною технологічних процесів на залізничних станціях. Він забезпечує оперативну комунікацію між різними службами. Залежно від функціональних обов'язків, абонентів станційного радіозв'язку можна розділити на три основні групи: персонал, що займається маневровими роботами (СРЗ-МГ), технічний персонал (СРЗ-Т) та диспетчери великих станцій та рухомі ремонтні бригади, які виконують ремонтні роботи на коліях (СРЗ-У). Для кожної групи організована своя радіомережа з використанням відповідного обладнання та частот.

Коли на залізниці проводять ремонтні роботи, важливо, щоб усі залучені до цього процесу працівники могли швидко і ефективно спілкуватися між собою. Для цього використовують спеціальний радіозв'язок, який поділяється на основні три види: службовий оперативний радіозв'язок (РОРЗ-Т): Ця мережа дозволяє ремонтникам зв'язатися не тільки між собою, але й з іншими службами залізниці, використовуючи звичайні телефони. Це особливо важливо на великих станціях, де багато різних служб беруть участь у ремонтних роботах; лінійний диспетчерський радіозв'язок (РОРЗ-Л): Ця мережа з'єднує керівників ремонтних робіт з диспетчерами, які відповідають за рух поїздів та інші процеси на залізниці. Це дозволяє координувати ремонтні роботи з рухом поїздів, щоб забезпечити безпеку; внутрішній радіозв'язок в зоні робіт (РОРЗ-В): Ця мережа використовується для спілкування між самими ремонтниками, які безпосередньо виконують роботи на колії. Це дозволяє їм координувати свої дії і швидко реагувати на будь-які непередбачені ситуації.

На сьогоднішній день у світі найбільше розповсюджені три види цифрових радіотехнологій:

- 1) система транкінгового радіозв'язку TETRA;
- 2) системи радіозв'язку GSM-R, що були створені на основі стандарту GSM;
- 3) стандартизований радіозв'язок LTE, який застосовує широкий спектр частот.

Існує велика кількість різних механізмів щодо розвитку радіозв'язку, які впливають на усю область систем, що керують залізницею. Це надає нам можливість проводити глибокі дослідження, які допоможуть вдосконалити та автоматизувати процеси використання радіотехнологій на залізничних дорогах України [1,2].

1.2 Особливості, структура та технічні характеристики системи транкінгового радіозв'язку TETRA

Система транкінгового радіозв'язку TETRA (Terrestrial Trunked Radio) була створена на наземному мобільному радіостандарті, як професійна система для застосування службами екстреної допомоги, військовими підрозділами, урядовими організаціями, ліній громадянської безпеки, транспортних послуг в тому числі і на залізниці. Вперше її було винайдено у 1995 році Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів (ETSI). Вона застосовувала спосіб використання радіочастот (TDMA) з модуляцією PI/4 QPSK, в якій було задіяно чотири керованих канали на радіонесучій частоті та растрового каналу 25 кГц. В Україні вона працює в діапазоні частот 450 МГц. В системі було задіяно два види передачі інформації: точка-точка та точка-багато точок [3].

Архітектура комплексу системи TETRA складається з наступних елементів:

- 1) пристрій керування базовою станцією (BCF), який відповідає за злагоджену роботу декількох базових станцій і надає зв'язок до зовнішніх мереж таких як PDN, ISDN, PSTN;
- 2) мобільної станції (MS);

3) базової станції (BTS), що передбачає наявність зв'язку у заданому районі. Здійснює прийом та передачу радіосигналів, шифрування лінії зв'язку, сполучення з мобільними станціями та контроль вихідної потужності сигналів.

4) контролер базової станції (BSC) виступає як потужний диспетчер, який забезпечує зв'язок між кількома BCF. Він може об'єднувати різні інтерфейси мережі TETRA в одну велику систему.

5) термінал TOE – пристрій, якому наведена роль контролю та управління станом системи.

6) Диспетчерський пульт (ДП) – це робоче місце оператора, з якого він може керувати всією мережею. Звідси він може підключатися до різних станцій, стежити за розмовами і вирішувати різні завдання.

7) Стационарна радіостанція (FRS) – це станція, яка встановлена в одному місці, наприклад, на пульті диспетчера.

Через те, що вся система складається з різних модулів, вона може бути побудована найрізноманітнішими конфігураціями. При цьому вихід одного з модулів з ладу призводить лише до обмеження працездатності мережі, а не повної її зупинки.

Для мобільних станцій TETRA доступно два режими спілкування: DMO – спілкування в прямому режимі та TMO – транкінговий режим із застосування комплексу управління та комутацій, побудований на основі базових станцій TETRA (TBS). Особливостями режиму DMO являються: здатність безперервної роботи в місцях де відсутній зв'язок та робота одразу з декількома вузлами пристроїв TETRA. Дана властивість надає можливість до використання каналу за схемами: від DMO до TMO або від DMO до DMO. Завдяки цьому в складних умовах експлуатації можливо встановлювати прямий зв'язок.

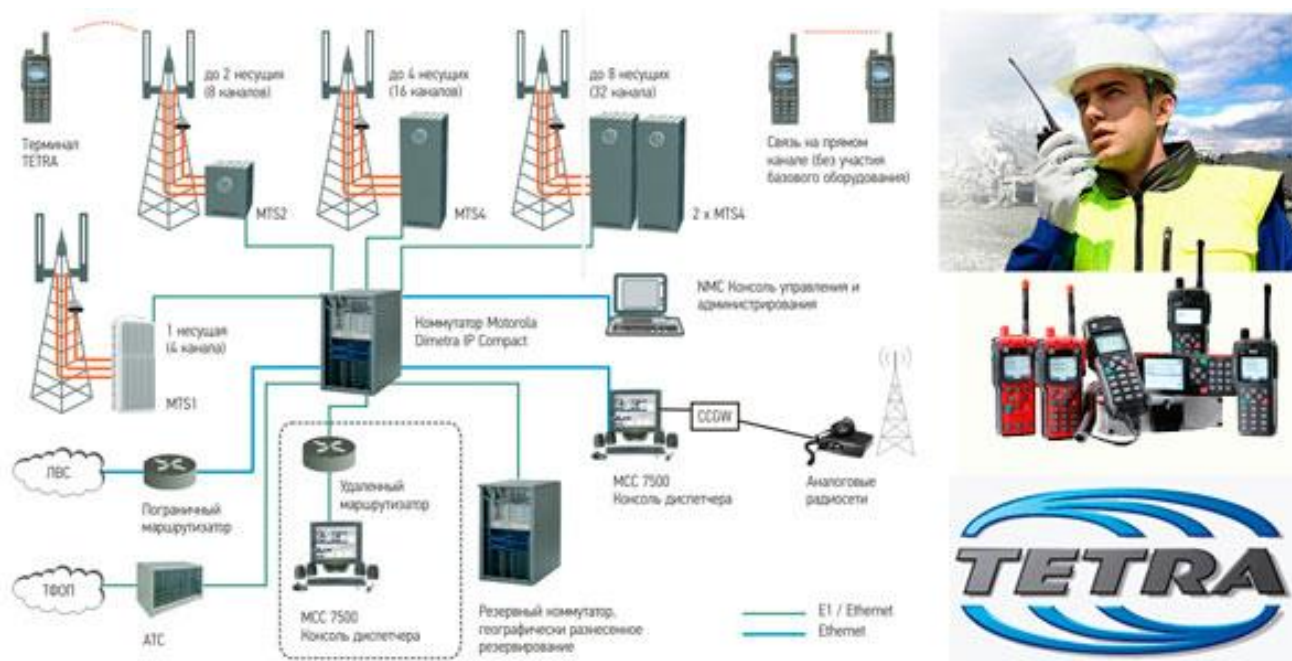


Рисунок 1.2 – Структурна схема системи зв'язку TETRA

До комплексу TETRA входять диспетчерські та голосові послуги, що працюють з наступними видами даних: основний канал, що використовується при управлінні системою. Він приймає повідомлення служби SDS та сигнали про стан системи. Спеціалізовані канали призначенні для співпраці з переданими даними, які комутують канали або з тими що, комутують пакети. Аутентифікація вузлів відносно інфраструктури в обох напрямках виконується комплексом. Система безпеки представлена у вигляді наскрізного шифрування та шифруванням повітряного інтерфейсу. Універсальний режим роботи працює наступним чином: абонент натискає кнопку і відбувається зв'язок з абонентом або диспетчером обраної групи виклику.

Комплекс TETRA розповсюджений по всьому світу, з успіхом засовується в підземному та швидкісному транспорті.

З проведених досліджень комплексу TETRA відомо, що швидкість не дуже впливає на працездатність системи через застосування прямої корекції помилок, тому в деяких країнах вона працює на швидкостях до 300 км/год [3,4].

1.3 Система цифрового радіозв'язку для залізничного транспорту GSM-R

1.3.1 Особливості, структура та технічні характеристики системи GSM-R

У 1997 році в Європі вперше почали впроваджувати систему цифрового радіозв'язку для залізничного транспорту GSM-R, яка була побудована на найбільш поширеному та дослідженому у світі стандарті мобільного зв'язку GSM. Він був заснований за програмами Mobile Radio for Railways Networks in Europe (MORANE) та European Integrated Railway Radio Enhanced Network (EIRENE). Створення системи дозволило удосконалити та розширити функції радіомереж, що призвело до покращення безпеки та якості зв'язку.

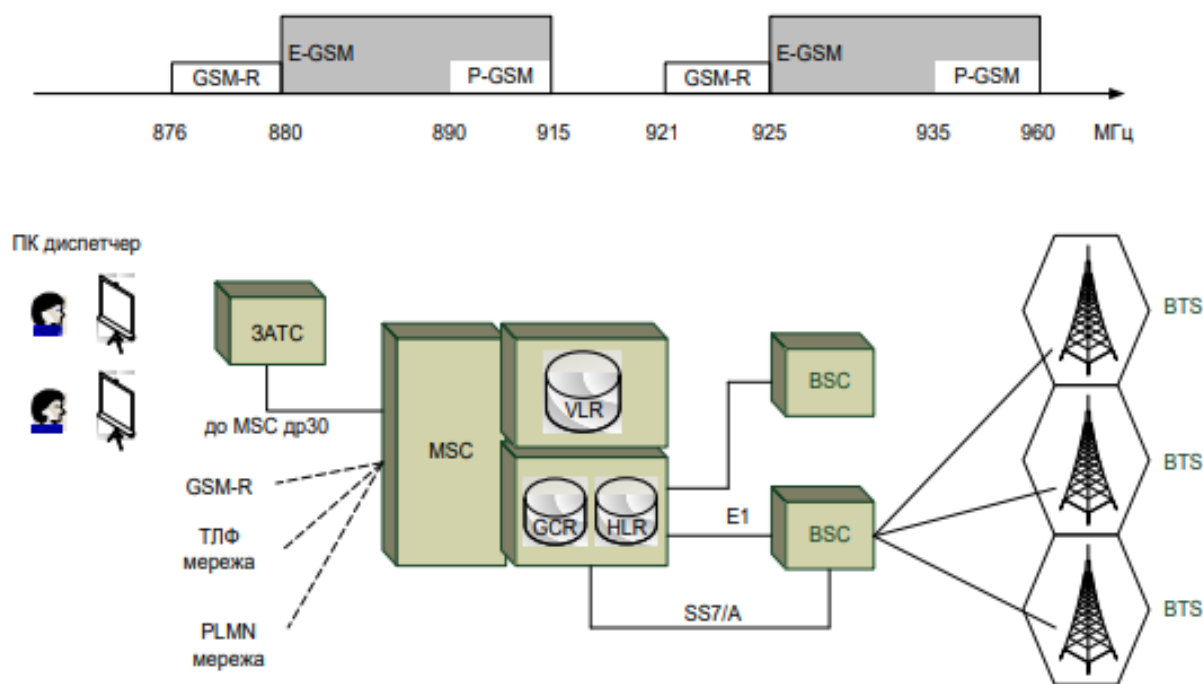


Рисунок 1.3 – Структурна схема системи зв'язку GSM-R

Система GSM-R працює на смузі частот 900 МГц та складається з: вузлів мобільних радіостанцій користувачів; вузлів базових станцій; комутаційний та мережевий вузол.

Вузли мобільних радіостанцій користувачів забезпечуються зв'язок абонентів з ресурсами системи GSM-R. До складу мобільної радіостанції входить; SIM-картка (блок ідентифікації користувача) та невеликої антени, що встановлена на

приймально-передавальному модулі. В блоці ідентифікації користувача знаходяться дані абонента, які надають йому пропуск до зв'язку з мережею, через обмін інформації між мережею та мобільною станцією. Підприємство створює дві різновидності радіостанцій: перша - встановлені на рухомі одиниці мобільні радіостанції, друга – мікротелефона трубка. Високий рівень передачі сигналів досягається використанням автоматичного контролю потужності передавача. На залізниці абонентські радіостанції знаходяться в захисних оболонках, працюють на усьому частотному діапазоні GSM та обладнані кнопкою екстреного виклику.

Вузли базових станцій BSS (Base Station Sub-system) включають наступне устаткування: пара базових станцій BTS (Base Transceiver Station) та один контролер BSC (Base Station Controller). Базові станції сформовані з двох рознесених антен та радіоприладів, що здатні приймати та відправляти сигнали. Однією з характеристик базової станції є синхронне відправлення даних на різних частотах новостворених каналів. Це можливо через використання декількох передатчиків. Працездатність всіх вузлів базових станцій підтримується контролером. Цифровий потік, що функціонує на швидкості 2048 кбіт/с, відповідає за контакт між центром комутації мобільного зв'язку та контролером базових станцій.

Функціями керування викликів та їх маршрутизацією займається комутаційний центр мобільного зв'язку MSC (Mobile Switching Center). У відповідальність цього вузла також входить безперервний нагляд за рухомими одиницями при застосуванні реєстрів пересування VLR (Visited Location Register) та реєстрів розташування HLR (Home Location Register). Реєстр пересування VLR (Visited Location Register) є головним приладом за допомогою якого відбувається нагляд за переміщенням рухомої станції з однієї ділянки на іншу. Він дозволяє працювати мобільній станції за межами зон, що контролюється реєстром місцезнаходження. При пересуванні рухомої станції з ділянки керованої одним контролером базової станції BSC до ділянки, що керується другим контролером базової станції BSC, вона записується другим BSC та у реєстрі пересування з'являються данні, в яких міститься номер зони зв'язку, що відповідає за постачання викликів мобільної

станції. Регістр місцезнаходження містить дані про розташування довільної мобільної станції, які надають можливість вузлу комутації викликати абонентів. Іншими словами регістр HLR – це інформаційна база абонентів, що були записані в мережі. Він володіє IMSI - міжнародним ідентифікаційним номером рухомого абонента. Основна функція ідентифікаційного номеру полягає у розпізнаванні рухомих станцій за допомогою центру аутентифікації AUC. Являючи собою інформаційну базу абонентів, у регістр розташування записані наступні данні: властивості аутентичності користувачів, перелік функцій зв'язку, особливої інформації про маршрутизацію, адреси та номери, які мають IMSI. Для безпеки інформації, записаної в регістрах VLR та HLR, їх обладнання пам'яті захищено від несправностей. Інформація в обох регістрах однакова, але в регістрі VLR вона зберігається лише коли абонента розташовується на ділянці, керованій ним.

Стільники мережі GSM розподілені по географічним ділянкам, що мають назву LA та свій унікальний номер LAC. Будь-який регістр пересування володіє інформацією про користувачів з кількох LA. Регістр VLR оновлює інформацію, яку отримує при зміщенні положення користувача, що приводить до зміни ділянки LA. Коли два різних регістри пересування керують новою та старою LA, то інформація, яка міститься в старому регістрі пересування, видаляється одразу після її перезапису в новий регістр. Оновлюється і поточне місцезнаходження користувача, яке записано в регістрі розташування. Одна з задач регістру пересування полягає в сортуванні номерів передачі керування, коли відбувається передача з'єднання між двома різними MSC.

За безпеку від втручання в роботу системи, відповідає апарат аутентифікації. Він перевіряє дані абонента. Регістр ідентифікації обладнання EIR містить базу даних користувачів, на основі якої AUC здійснює дії по з'ясуванню ключів шифрування абонентських станцій та їх критеріїв при процесі аутентифікації.

Диспетчерська підсистема, що входить у мережну конструкцію GSM-R, містить диспетчерський сервер та відомчої АТС. Машиніст або диспетчер, за допомогою пульта, можуть реалізовувати зв'язок між собою, шляхом набору через нього доцільного номеру диспетчера або доцільного номеру радіостанції рухомого

складу. Персональний комп'ютер з монітором зробленим за способом Touch-Screen є основою для пульта керування диспетчера. Кожен тип зв'язку має свою сторінку на моніторі, що мають вигляд відповідних інформаційно-управляючих панелей з визначеними типами об'єктів. Усі екранні форми містять вікна з даними про типи зв'язку доцільними робочому місцю, що отримуються в режимі реального часу. Наприклад, на пульті диспетчера зображена сторінка зв'язку з бригадами пасажирських поїздів та організації поїзного радіозв'язку. Кожна екранна форма повинна бути облаштована всіма кнопками, відповідними згідно визначеного типу зв'язку, тобто виклик абонента, скидання та інші.

В комутаційному центрі мобільного зв'язку мережі GSM-R є спеціалізовані сервіси, які включають механізм пріоритетів, групові і циркулярні виклики, адресацію на основі розташування і функціональну адресацію. Ці функції важливі для залізничного технологічного радіозв'язку. Всі ці сервіси реалізуються за допомогою нового функціонального блоку — реєстра групових викликів (GCR). У GCR зберігається інформація про різні характеристики групових викликів та пріоритетність абонентів. Саме реєстр GCR слідкує за сервісами групових викликів, забезпечуючи ефективно і надійне управління цими функціями.

Функції групових та циркулярних викликів забезпечують можливість одночасної комунікації з множиною абонентів, що перебувають в межах певної географічної зони. Це дозволяє, зокрема, організувати одночасне інформування всіх машиністів на ділянці відповідальності диспетчера.

Механізм пріоритезації забезпечує встановлення з'єднання з більш високим пріоритетом навіть за умов обмежених мережевих ресурсів. Різним типам викликів присвоюються різні класи якості обслуговування QoS (Quality of Service) відповідно до рекомендацій МСЗ. Виклики з вищим QoS обробляються переважно, а при відсутності вільних ресурсів можуть бути призупинені виклики з нижчим QoS. Система здатна до динамічної зміни пріоритетів абонентів. Кожному абоненту в мережі GSM-R присвоюється індивідуальний рівень пріоритету, який визначає його місце в черзі на обслуговування.

Мережі GSM-R підтримують функціональну адресацію (FA) та адресацію залежно від місця знаходження (LDA), що розширює можливості ідентифікації та маршрутизації викликів.

Функціональна адресація (FA) дозволяє ідентифікувати абонента в мережі GSM-R не тільки за його фізичним абонентським номером, але й за функціональним номером (FN). Наприклад, машиніста можна викликати, ввівши номер поїзда та його функціональний номер, що відповідає його ролі в екіпажі. Це спрощує процедуру виклику та робить її більш надійною. Крім того, функція адресації залежно від місця знаходження (LDA) дозволяє абоненту автоматично підключатися до потрібного диспетчера, незалежно від того, в якій зоні обслуговування він знаходиться. Машиністу достатньо набрати один уніфікований номер, щоб встановити зв'язок з диспетчером, відповідальним за дану ділянку шляху.

Розміщення базових станцій GSM вздовж залізничних колій дозволяє створювати віртуальні мережі для внутрішнього використання на залізницях. Такий підхід забезпечує технічну можливість організації спеціалізованих мереж радіозв'язку, таких як ROP3-T, без створення окремої інфраструктури.

Використання єдиної апаратної платформи для різних типів мереж в системі GSM-R на залізничному транспорті призвело до значного підвищення ефективності застосування технологічного радіозв'язку. Об'єднання різних типів мереж на єдиній технічній базі спрощує експлуатацію та обслуговування системи в цілому. Завдяки покращенню якості зв'язку, надійності обладнання та розширенню функціональних можливостей, GSM-R дозволяє оптимізувати управління перевізним процесом, підвищити безпеку руху та покращити якість обслуговування пасажирів.

На другому етапі розвитку системи GSM-R відбулась її інтеграція в європейську систему автоматичного управління рухом поїздів (ETCS). Це означає, що замість традиційних світлофорів та інших засобів візуальної сигналізації, машиніст отримуватиме всю необхідну інформацію про стан колій та рекомендовану швидкість безпосередньо в кабіну локомотива через мережу GSM-R. Ця інформація

передається від централізованої системи управління рухом (RBC) на бортовий комп'ютер локомотива.

На ділянках залізниці, де рухаються поїзди різних категорій, часто використовується комбінована система радіозв'язку. Поруч із традиційними аналоговими системами, що відповідають усім необхідним нормам, впроваджується сучасна цифрова система GSM-R. Це дозволяє створити більш надійну та функціональну мережу. Така комбінована система, як показано на рисунку 1.4, працює в декількох частотних діапазонах: низькочастотному для допоміжного зв'язку, метровому діапазоні для зонного зв'язку та в діапазоні GSM-R для цифрового зв'язку. Використання різних частотних діапазонів забезпечує резервування каналів та підвищує загальну надійність системи, особливо важливу для систем автоматичного регулювання руху поїздів. Адже при використанні лише одного каналу радіозв'язку досягти високого рівня безперебійної роботи дуже складно.

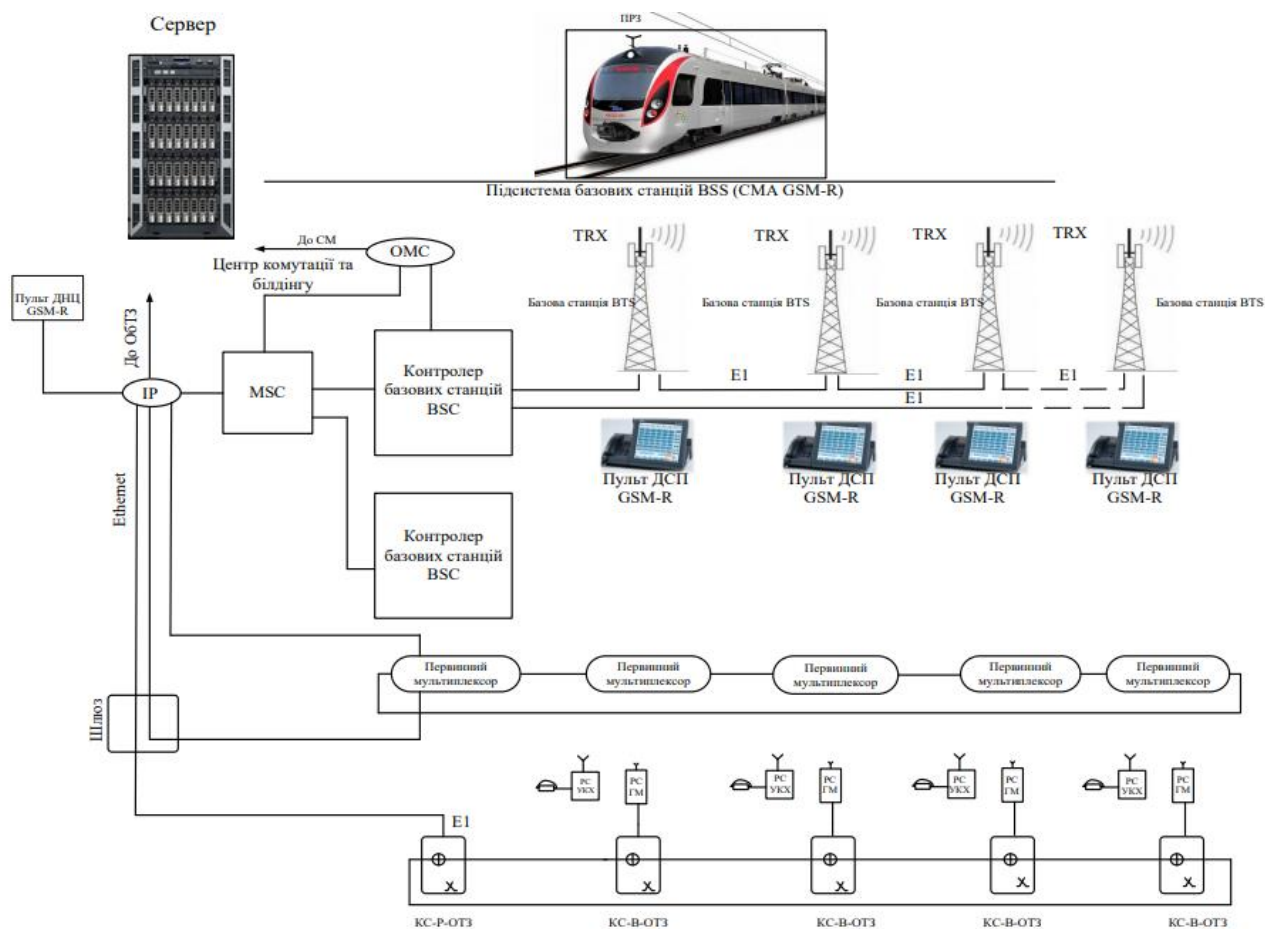


Рисунок 1.4 – Комбінована система організації мереж поїзного радіозв'язку

Системи GSM-R оптимально підходять для залізничних ліній, де здійснюється швидкісний рух поїздів, а також для ліній I категорії, які використовуються для основних міжнародних та внутрішніх перевезень [1,3].

Системи GSM-R та комерційна GSM хоча і базуються на однаковому базовому стандарті зв'язку, мають ряд суттєвих відмінностей, які обумовлені специфічними вимогами використання, що зображені у вигляді порівняння у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика систем GSM-R та комерційної GSM

Характеристика	GSM-R	Комерційна система GSM
Призначення	Залізничний транспорт	Широке використання
Покриття	Залізничні колії	Великі території
Якість сервісу	Пріоритет надійності	Пріоритет якості голосового зв'язку
Пропускна здатність	Менша	Вища
Захищеність	Вища	Залежить від оператора
Можливості	Спеціалізовані	Широкий спектр послуг

Основними відмінностями є:

1) Якість сервісу. У системі GSM-R головний пріоритет отримує передача даних, яка відповідає за безпеку руху поїздів, що внаслідок цього підвищує надійність передачі критично важливих даних, але голосовий зв'язок менш якісний за комерційних мереж. В свою чергу система GSM орієнтована на надання широкого спектру послуг, включаючи голосовий зв'язок, передачу даних, SMS та інші, з акцентом на якість голосового зв'язку.

2) Покриття. Покриття мережі GSM-R розраховано виключно на залізничні колії та прилеглі території, забезпечуючи безперервний зв'язок вздовж маршрутів руху поїздів. В той самий час, комерційні мережі GSM покривають великі території, включаючи міста, села та інші населені пункти.

3) Пропускна здатність. За пропускнуою здатністю система GSM-R значно відстає від комерційної системи GSM, бо пріоритетом виступає надійність та

безпека, а не швидкість передачі великих обсягів даних. Тоді як система GSM постійно розвивається і пропонує високу пропускну здатність, що дозволяє користувачам швидко передавати дані та користуватися інтернетом.

4) Захищеність. У цьому аспекті мережа GSM-R має перевагу, через те що використовується для критично важливих систем управління рухом поїздів. Система захищена від перешкод та несанкціонованого доступу. Водночас у мережі GSM захищеність залежить від оператора та тарифу, та при цьому зазвичай нижче, ніж у GSM-R.

5) Можливості. Система GSM-R виступає як спеціалізована система, призначена для задоволення потреб залізничного транспорту. Вона забезпечує надійний зв'язок між поїздами, станціями та диспетчерськими центрами. А система GSM пропонує широкий спектр послуг, включаючи голосовий зв'язок, передачу даних, SMS, мобільний інтернет та інші.

Отже системи GSM-R та комерційна система GSM – це дві різні системи, кожна з яких має свої переваги і недоліки. GSM-R є спеціалізованою системою, призначеною для задоволення потреб залізничного транспорту, тоді як комерційна система GSM пропонує широкий спектр послуг для масового користувача [5].

1.3.2 Застосування технології GSM-R в системі ERTMS

GSM-R (Global System for Mobile communications – Railway) – це стандарт радіозв'язку, спеціально розроблений для залізничного транспорту. ERTMS (European Rail Traffic Management System) – європейська система управління рухом поїздів, яка передбачає високий рівень автоматизації та безпеки руху.

GSM-R є невід'ємною частиною ERTMS, забезпечуючи передачу сигнальних інформації та даних між різними компонентами системи, основне значення якого полягає в: передачі сигналів, що інформують машиніста про дозволену швидкість, стан колій, наявність перешкод та інші важливі параметри руху; забезпеченні двостороннього голосового та інформаційного зв'язку між машиністом та диспетчером; підтримка групового зв'язку, що дозволяє організувати спілкування

між кількома учасниками, наприклад, між машиністами різних поїздів або між диспетчерами різних ділянок; передача даних, які відповідають за місцезнаходження поїзда, інформацію про його технічний стан обладнання та інші.

Перевагами використання GSM-R в ERTMS є: висока надійність, гнучкість до умов експлуатації, високий рівень безпеки даних та ефективність застосування залізничної інфраструктури. Але як і в будь якій системі, йому притаманні недоліки технічного, організаційного та економічного планів. Стандарт GSM-R в ERTMS має певні обмеження при передачі значних обсягів даних або перевантаженням їх кількості. Він також схильний до перешкод від інших радіосигналів, особливо в районах з високою щільністю населення. Висока вартість, залежність від постачальників та складність інтеграції з іншими системами так само впливають на розповсюдження стандарту.

Стандарт GSM-R застосовується в 2 та 3 рівнях ETCS.

На другому рівні ETCS система автоматично регулює швидкість поїзда відповідно до дозволеної швидкості, яка передається на борт поїзда через GSM-R. Стандарт використовується для передачі інформації про перешкоди на шляху руху поїзда, такі як розриви колії, зайняті колії або інші об'єкти. Система забезпечує захист від перевищення дозволеної швидкості, автоматично ініціюючи екстрене гальмування у разі небезпечної ситуації та дозволяє машиністу підтримувати голосовий зв'язок з диспетчером, що особливо важливо в нестандартних ситуаціях. схема роботи GSM-R в 2 рівні ETCS складається з: бортового комп'ютеру (отримує інформацію від центра управління рухом та порівнює її зі своїми даними про поточну швидкість та місцезнаходження поїзда і видає команди на гальмівну систему), центра управління рухом RBC (розраховує дозволена швидкість для кожної ділянки колії та передає цю інформацію на бортовий комп'ютер поїзда через GSM-R), GSM-R (забезпечує надійну передачу даних між RBC та бортовим комп'ютером).

Третій рівень ETCS передбачає повну автоматизацію, тому він включає в себе наступні параметри: безпілотний рух (машиніст не приймає участі у русі поїзда, їм керує лише бортовий комп'ютер); розширює можливості стандарту GSM-R

(збільшення обсягів даних, що можливо передавати, моніторинг стану обладнання та інші функції); має властивість до інтеграції з іншими системами такими як обліку енергоспоживання та інші.

GSM-R відіграє ключову роль в системі ERTMS, забезпечуючи надійний і ефективний зв'язок між усіма елементами системи. Завдяки своїм можливостям, GSM-R дозволяє підвищити безпеку руху поїздів, збільшити пропускну здатність залізниць та покращити якість транспортних послуг [6].

1.4 Особливості системи залізничного радіозв'язку FRMCS

Система залізничного радіозв'язку FRMCS – це нова перспективна система мобільного зв'язку, що створена з метою заміни старої технології GSM-R, термін експлуатації якої закінчиться к 2030 року. Розробка стандарту почалась ще у 2015 році. Основою системи майбутнього радіозв'язку виступають стандарти мобільного зв'язку 4G та 5G. У лютому 2020 року були прийняті специфікації вимог та почалося тестування проекту «5G Rail». Закінчення стандартизації FRMCS заплановано на 2024 рік, а з 2025 по 2035 буде відбуватися плавна розгортка системи на дорогах Європи. Дорожня карта з розвитку системи FRMCS представлена на рисунку 1.5 [7].

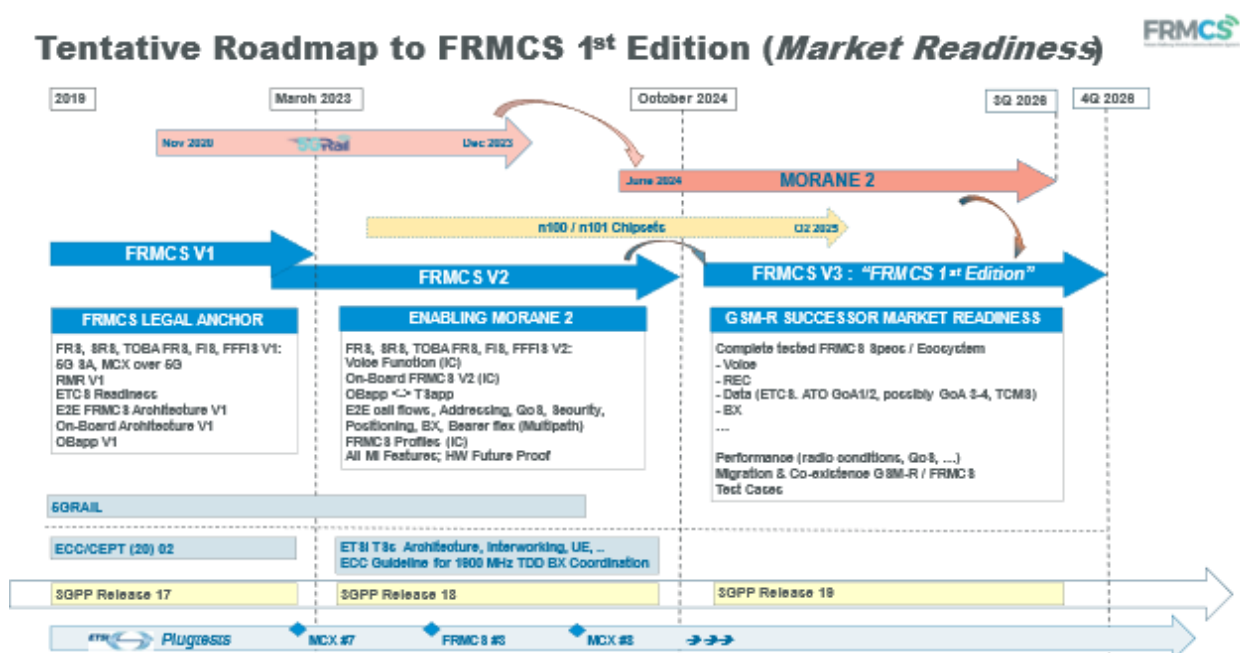


Рисунок 1.5 – План розвитку системи FRMCS

Будова системи FRMCS складається з трьох функціональних блоків: послуги, транспорт та додатки. Завдяки цьому розділенню стандарт гнучкий та здатен працювати з різними додатками, як новими так і застарілими, відповідає вимогам QoS, і це все надає властивість плавно співпрацювати з стандартом GSM-R. У FRMCS передбачений наступний діапазон частот: при застосуванні непарних полос частот 1900-1910 МГц, а у парних частот 874,4-880,0 МГц та 919,4-925,0 МГц. Це було прийнято рішенням європейської комісії у січні 2021 року. У свою чергу для ITS TC RT та Urban Rail використовують частоти 5ГГц (5875-5925 МГц).

Перехід на стандарт FRMCS дозволить перейти безпосередньо до високої швидкості обміну даних та безперебійного зв'язку. Охоплення сільських та віддалених районів є одною з переваг технології, яка була досягнута ефективністю 5G. Іншою перевагою системи є можливість застосування автономних поїздів. В той самий час впровадження FRMCS потребує дуже детальне планування, вивчення та моделювання усіх можливих сценаріїв роботи системи.

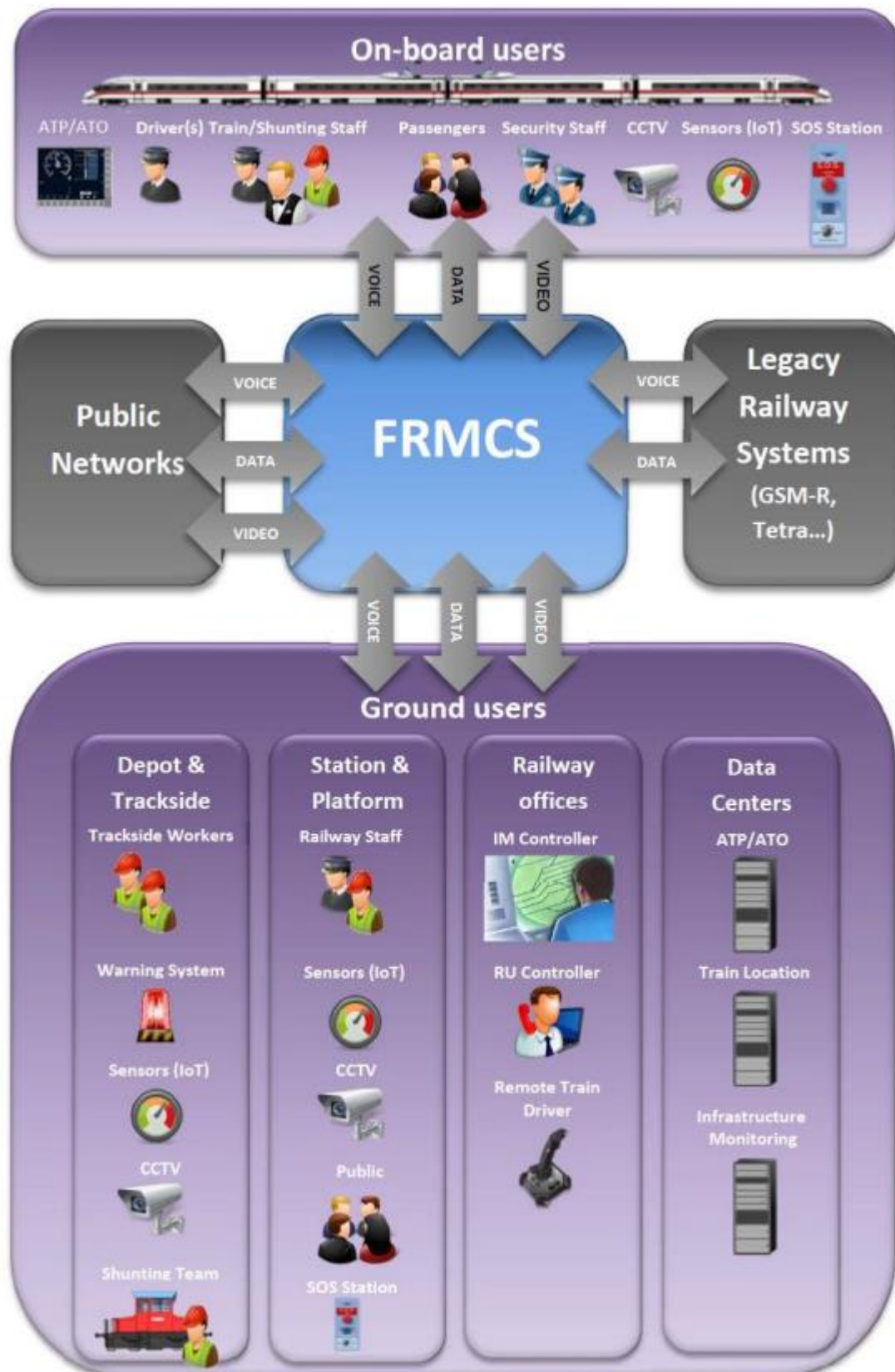


Рисунок 1.6 – Основне призначення системи FRMCS

На сьогодні в європейських тендерах на поїзди закладена їх сумісність з стандартом FRMCS. Тому різні країни Європи вже почали підписувати контракти

на трансформацію своїх залізничних мереж. Наприклад, німецька компанія Deutsche Bahn готується перейти на нього між 2026 та 2035 роками, через що перші тести системи розпочнуться у 2027 році; у Франція перехід запланований до 2030 року; Швейцарія в той самий час вже визначила перші 3500 базових станцій для його застосування.

FRMCS є перспективною технологією, яка відкриває нові можливості для розвитку залізничного транспорту. Розвиток і використання FRMCS дозволить зробити залізничний транспорт більш безпечним, ефективним і привабливим для пасажирів і вантажовідправників [8,9].

1.5 Висновки за розділом

Підсумовуючи усю описану інформацію зробимо наступний аналіз. Цифровий радіозв'язок відіграє дуже важливу роль в роботі залізниці. Він використовується майже у всіх сферах цієї галузі. Використання цієї технології надає можливість своєчасно отримувати різну інформацію, спільно вирішувати виникаючі проблеми, контролювати стан роботи залізниці. З розвитком радіозв'язку з'являються багато нових рішень, які не тільки збільшують безпеку залізниці, але і її ефективність. Докладне вивчення існуючих і нових технологій такий як GSM-R, FRMCS дозволить нам знайти ефективні способи впровадження їх на залізниці України, внаслідок чого ми отримуємо велике зростання продуктивності залізничних доріг нашої країни.

РОЗДІЛ 2 СТРУКТУРА ТА ПРИНЦИП ДІЇ СИСТЕМИ ІНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З ВІРТУАЛЬНИМИ БЛОК-ДІЛЯНКАМИ

2.1 Структура системи інтервального регулювання рухом поїздів з віртуальними блок-ділянками

Для розробки вітчизняної системи інтервального регулювання на базі цифрового радіозв'язку візьмемо за основу гібридну систему ERTMS 3 рівня. Ця система побудована на базі радіозв'язку. Головна особливість її роботи полягає в тому, що система знає в будь-який момент часу де розташований поїзд, його характеристики, стан та швидкість руху. Для цього до обладнання кожного поїзда підключають вузол, який відповідає за відстеження цілісності поїзда. Отримана інформація через радіо-канал потрапляє на головний контролер, який аналізує її та надає оперативну поїзну ситуацію працівникам залізниці. Щоб уникнути недоліку, що представлений у втраті радіозв'язку з контролером, у гібридній системі ERTMS 3 рівня передбачено встановлення датчиків виявлення поїзду. Тобто використовуючи за основу цю систему, ми можемо побудувати на залізницях України свою систему контролю поїздів, з використанням віртуальних блок-ділянок (де стан поїзда контролюється за допомогою радіозв'язку) і реальних блок-ділянок (колійного обладнання, у випадках, коли його неможливо контролювати лише радіозв'язком).

Структурна схема системи інтервального руху з віртуальними блок-ділянками зображена на рисунку 2.1. Вона показує основні елементи системи:

- базові станції мобільного зв'язку BTS, що працюють за стандартом FRMCS і виконують функцію передачі радіосигналів з локомотива на центр радіо-блокування RBC;
- центр радіо-блокування RBC – відповідає за аналіз і декодування радіосигналів;
- супутникову навігаційну систему СНС, яка у поєднанні з електронною картою визначає місцезнаходження поїзда, та профіль колії;

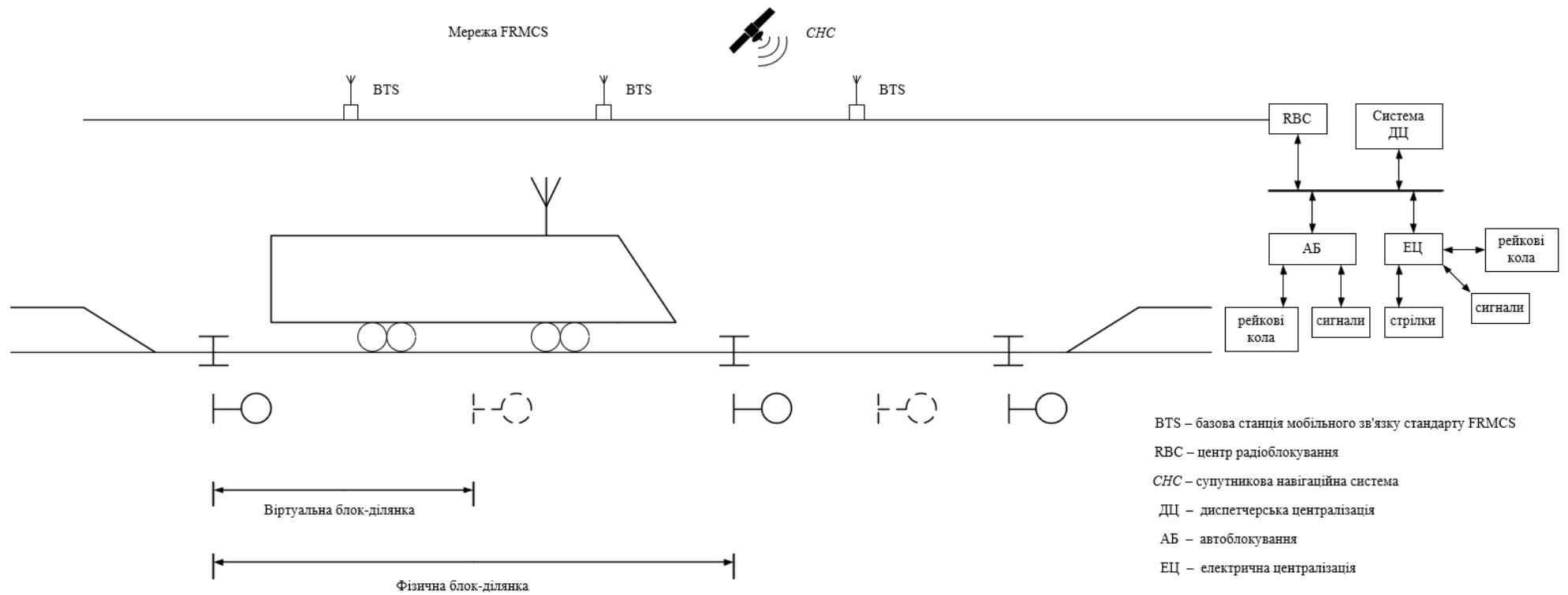


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи інтервального руху з віртуальними блок-ділянками

- диспетчерську централізацію, що планує і керує системою інтервального руху з віртуальними блок-ділянками;
- систему автоблокування, що залишається для роботи з фізичними елементами блок-ділянки;
- електричну централізацію, яка працює з фізичною інфраструктурою колії (стрілками, рейковими колами, сигналами);
- відображення довжин віртуальної і фізичної блок-ділянок.

Схема роботи системи регулювання інтервальним рухом поїздів представлена на рис. 2.2. Вона складається з наступних компонентів: системи диспетчерської централізації (ДЦ), системи локомотивної безпеки, наземної інфраструктури та системи супутникової навігації.

Система диспетчерської централізації (ДЦ) – відповідає за керування рухом на залізниці та має наступні модулі: модуль планування, що розробляє графіки руху поїздів, враховуючи стан колії, пропускну здатність та інші параметри; модуль керування віртуальними блок-ділянками – активно формує та змінює розміри віртуальних блок-ділянок залежно від поточної ситуації на лінії; інтерфейсу побудованому за принципом системи ERTMS, який виконує функцію взаємодії з системою локомотивної безпеки поїздів та іншими елементами за прикладом системи ERTMS.

Система локомотивної безпеки поїзда здійснює контроль рухом за допомогою отримання та обробки даних. Вона складається з: блоку прийому даних – отримання від ДЦ інформації про дозволена швидкість, місцезнаходження віртуальних блок-ділянок та інші параметри; блоку керування рухом – забезпечення виконання команд ДЦ, контролює швидкість руху поїзда та його безпеку.

Наземна інфраструктура служить мостом, який зв'язує систему диспетчерської централізації з системою локомотивної безпеки поїзда. До її складової частини відносять: радіосистеми – зв'язок між ДЦ та системою локомотивної безпеки поїзда; датчики стану колії – збирання даних про стан колії, наявність перешкод тощо.

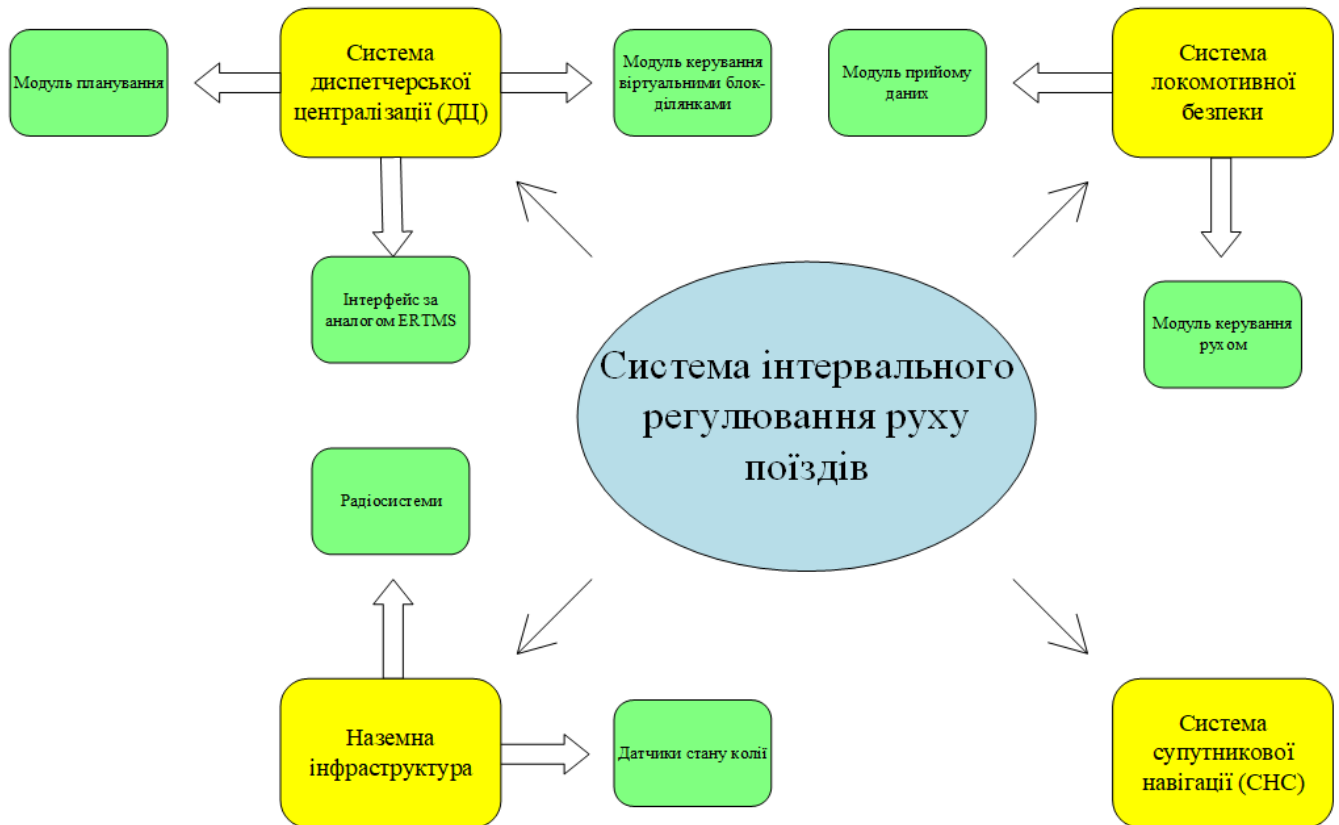


Рисунок 2.2 – Схема роботи системи регулювання інтервальним рухом

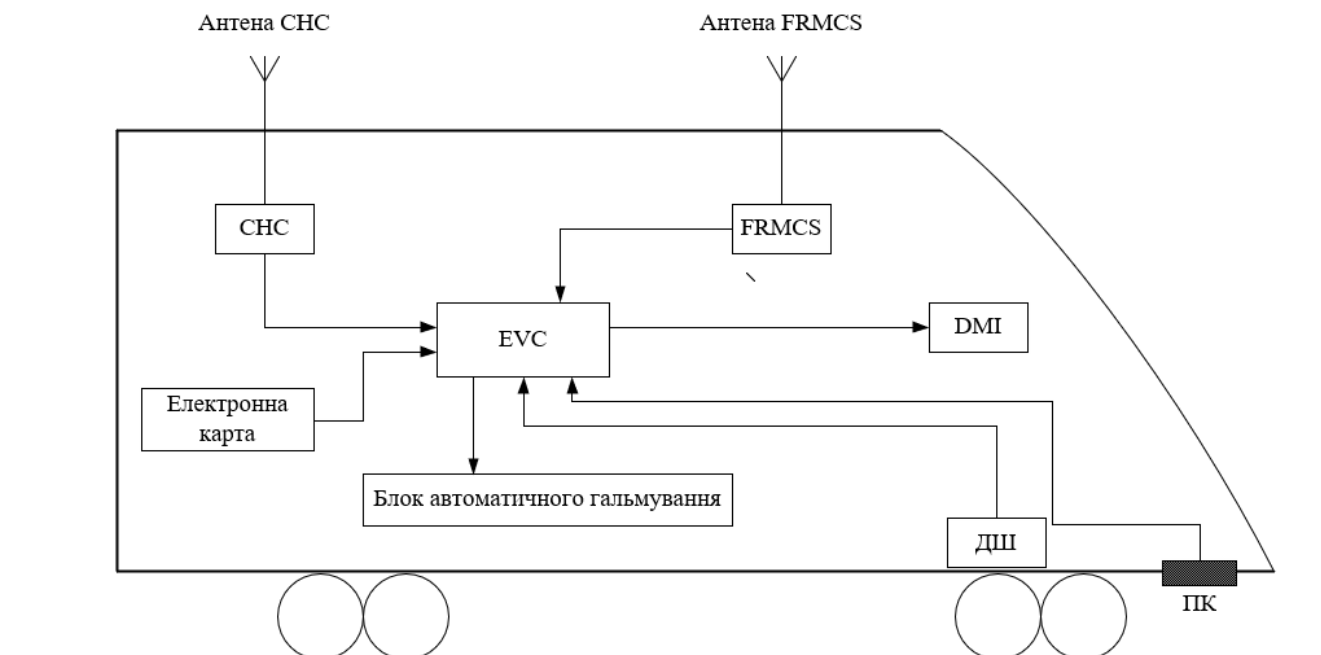
Для надання детальної інформації про профіль колії, розташування станцій, тунелів, мостів та інших інженерних споруд використовують систему супутникової навігації у поєднанні з електронною картою маршруту [10, 11].

2.2 Структура локомотивної системи безпеки

Основою локомотивної системи безпеки (рис. 2.3) виступає бортовий комп'ютер EVC, який має багатовступневий захист та резервування. Він отримує інформацію від наступних блоків:

- приймальні котушки (ПК) АЛС – обробка сигналів АЛС;
- датчики швидкості (ДШ) – знаходження фактичної швидкості локомотива, через визначення кількості обертів коліс;
- блок радіозв'язку FRMCS;
- блок супутникової навігації СНС;

- електронна карта.



EVC – безпечний бортовий комп'ютер

ДМІ – інтерфейс керування машиніста

СНС – модуль супутникової навігації

ДШ – датчики швидкості

ПК – приймальні котушки

Рисунок 2.3 – Структурна схема локомотивної системи безпеки

Проаналізувавши одержану інформацію, бортовий комп'ютер зображує її на блоці ДМІ (інтерфейсу керування машиніста), що виступає зв'язком між локомотивом та машиністом. Якщо машиніст перевищує допустиму швидкість і ніяк не реагує на повідомлення бортового комп'ютера, EVC звертається до блоку автоматичного гальмування [12, 13].

2.3 Алгоритм роботи локомотивної системи безпеки

З алгоритмом, за яким працює локомотивна система безпеки можливо ознайомитись на рис. 2.4.

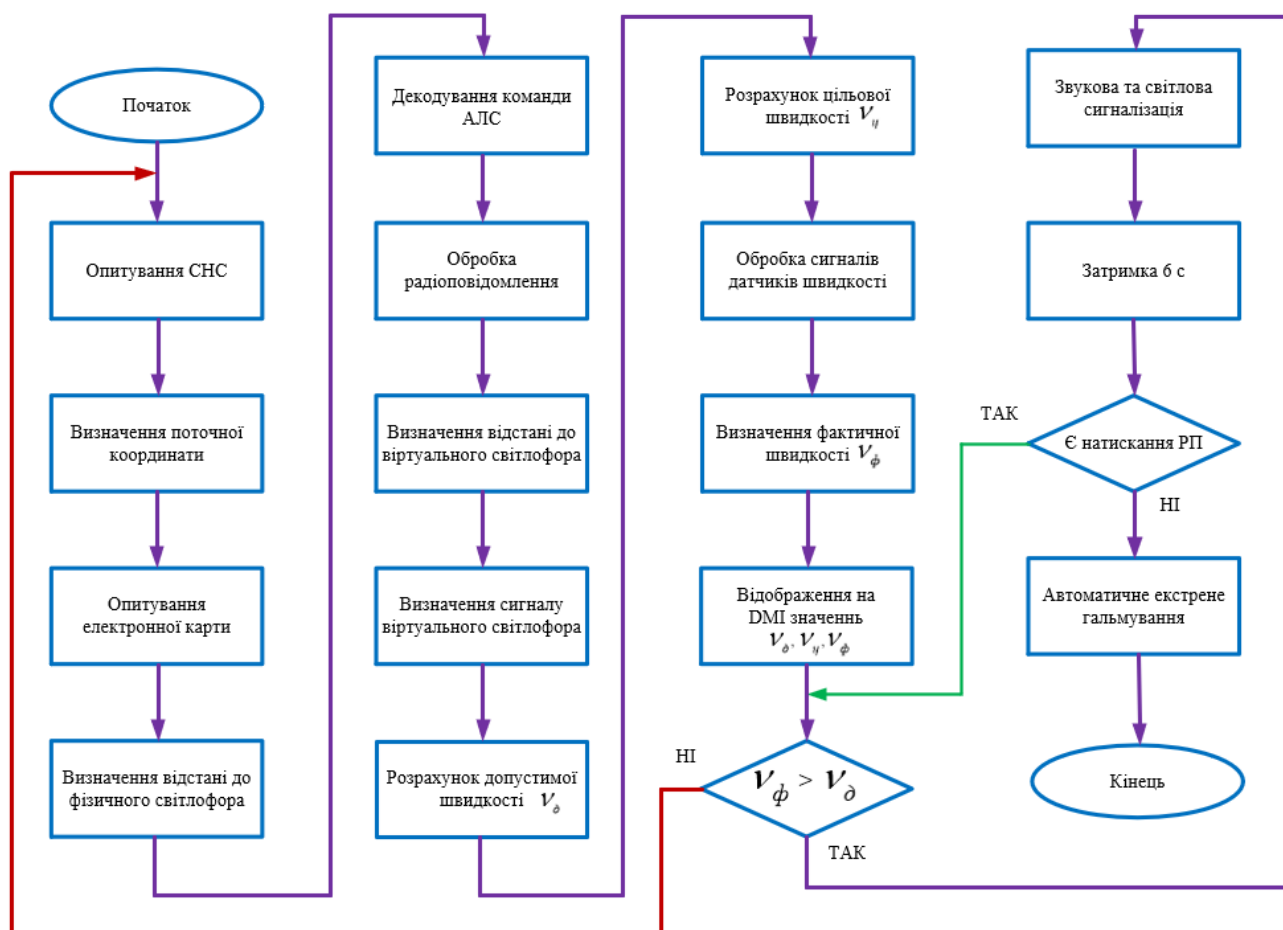


Рисунок 2.4 – Алгоритм роботи бортової локомотивної системи безпеки

Процес роботи системи починається з того, що комп'ютер, використовуючи супутникову навігацію, знаходить місцезнаходження локомотива. Потім, зчитуючи данні електронної карти, визначається координата місцезнаходження локомотива та відстань до наступного фізичного світлофора. Після цього, система дізнається значення світлофора через декодування сигналів АЛС. Наступним кроком, відбувається обробка радіоповідомлення FRMCS, та встановлюється координата можливого віртуального світлофора і відповідно його команда. Врахувавши всю отриману інформацію, система обчислює допустиму та цільову швидкості, а також аналізує сигнали з датчиків швидкості, що надає їй значення фактичної швидкості локомотиву. Усі отриманні данні про швидкості зображуються за допомогою інтерфейсу DMI на моніторі машиніста. В той самий час система перевіряє умову на перевищення допустимої швидкості. При нормальних значення допустимої швидкості алгоритм роботи починає цикл спочатку. Якщо показання допустимої

швидкості перевищують норму, то система звертається до світлової та звукової сигналізації. Далі вона чекає 6 секунд на реакцію машиніста. Якщо він натискає рукоятку пильності то система повертається до пункту зрівняння швидкостей до тих пір, поки не буде виконуватися норма. Якщо ж машиніст не натискає рукоятку пильності, то система застосовує автоматичне екстрене гальмування в результаті чого локомотив зупиняється, а алгоритм роботи локомотивної системи безпеки закінчується.

2.4 Висновки за розділом

Впровадження гібридної системи інтервального регулювання рухом з використанням, як фізичних блок-ділянок, так і віртуальних, за принципом гібридної системи ERTMS 3 рівня дозволить нам отримувати більш детальну інформацію про стан поїзда, що підвищить пропускну здатність та безпеку на залізницях України. При цьому, через те що вона гібридна, то її легко адаптувати з існуючими системами регулювання рухом і в майбутньому, при гарних показниках експлуатації можливо прийти до повної заміни старих систем на нові системи з віртуальними блок-ділянками.

РОЗДІЛ 3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ПЕРЕГОНУ ДЛЯ РІЗНИХ СИСТЕМ ІНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

3.1 Пропускна здатність перегону при застосовуванні тризначного або чотиризначного автоблокування

Щоб підвищити безпеку та швидкість руху поїздів на залізниці застосовують спеціальні системи керування, що отримали назву системи інтервального регулювання рухом поїздів (СІРРП). Вони дозволяють оптимізувати інтервали між поїздами, підтримуючі безперервний потік рухомого складу. Завдяки СІРРП зводиться до мінімуму ризик зіткнень, виходів поїздів за межі станції та інших аварійних ситуацій. До основних типів систем належать: напівавтоматичне блокування (ПАБ), автоблокування (АБ), автоматична локомотивна сигналізація (АЛС) та системи автоматичного управління гальмуванням поїзда (САУТ).

На зараз в Україні найрозповсюдженою системою СІРРП на перегонах представлена у вигляді системи автоблокування. Вона розділяє колію на окремі ділянки, а світлофори автоматично змінюють свої сигнали залежно від розташування поїздів. Завдяки цьому машиніст завжди знає, де знаходиться попередній поїзд і може безпечно рухатись. Для додаткової безпеки використовується автоматична локомотивна сигналізація (АЛС), яка дублює інформацію про сигнали світлофорів безпосередньо в кабіні машиніста.

Основна відмінність між системами автоблокування полягає в кількості сигналів, які подають світлофори. Тризначна система, що використовує зелений, жовтий і червоний сигнали, є найбільш поширеною. Усі сигнали світлофора попереджають машиніста про стан наступного світлофора. Оптимальний режим руху поїзда досягається при трьохблочному розмежуванні колії, коли поїзд рухається за принципом "від зеленого сигналу до зеленого сигналу", що гарантує плавність та безпеку руху. Однак, ця система має певні обмеження щодо пропускної здатності. Чотиризначна система, додатково використовуючи сигнал

"жовтий з зеленим", дозволяє збільшити пропускну здатність ліній за рахунок скорочення інтервалів між поїздами.

Значення пропускну здатності ділянки АБ визначається через знаходження мінімального безпечного інтервалу між поїздами. Цей інтервал розраховують для найповільніших ділянок колії, таких як підйоми, виходи зі станцій та приміські зони. Найбільше з отриманих значень і буде мінімальним безпечним інтервалом між поїздами. В залежності від типу поїзда (приміський, швидкісний, пасажирський або вантажний) міжпоїзний інтервал буде відрізнятися. При розрахунках зазвичай обирають лише один тип на всю ділянку, через що інші типи не раціонально використовують свій час.

Формула для знаходження відстані наближення рухомих складів при тризначному автоблокуванні:

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

де l_n – довжина поїзда, м; $l_{БЗ}$ – довжина блок-ділянки при застосуванні тризначного автоблокування, м.

При цьому час мінімального інтервалу при тризначному автоблокуванні визначається за формулою:

$$I_3 = 0.06 \frac{3l_{БЗ} + l_n}{V_{cp}} , \quad (3.2)$$

де 0.06 – коефіцієнт переводу з 1 км/год в 1 м/хв; V_{cp} – середня швидкість поїзда на обчислювальній ділянці км/год.

У випадку застосування чотиризначного АБ при розрахунках мінімального поїзного інтервалу повинні дотримуватися наступна умова: відстань двох сусідніх ділянок ($2l_{Б4}$) повинна бути не менше гальмівного шляху поїзда ($S_{T\max}$) при максимально можливій швидкості, та не менше пройденого шляху при екстремому гальмуванні зважаючи на час спрацювання пристрої АЛС та автостопу, але не менше 1000 м.

Отже формула для знаходження відстані наближення рухомих складів при чотиризначному автоблокуванні:

$$L_{4\min} = 4l_{Б4} + l_n, \quad (3.3)$$

А час мінімального інтервалу при чотиризначному автоблокуванні:

$$I_4 = 0.06 \frac{4l_{Б3} + l_n}{V_{cp}}, \quad (3.4)$$

Пропускнну здатність перегону для двоколіїної ділянки з пакетним рухом можливо розрахувати наступним чином:

$$N = \frac{1440}{I}, \quad (3.5)$$

де I – міжпоїзний інтервал, хв; 1440 – число хвилину за добу [14].

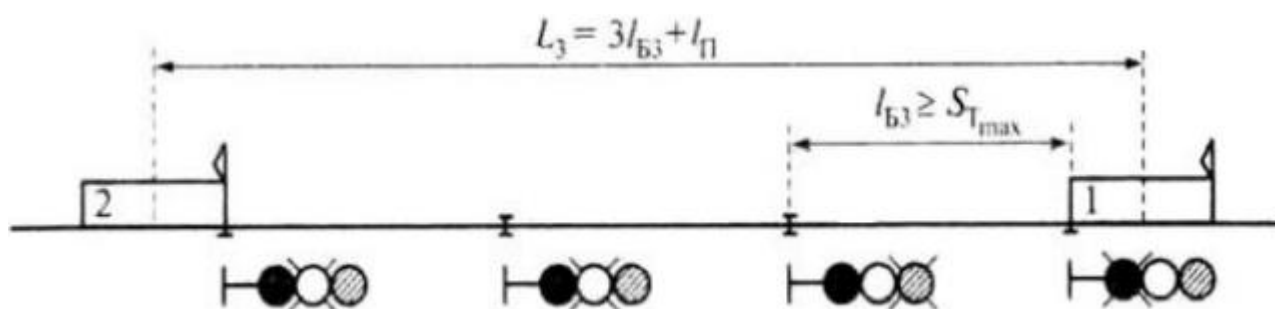


Рисунок 3.1 – Тризначне автоблокування

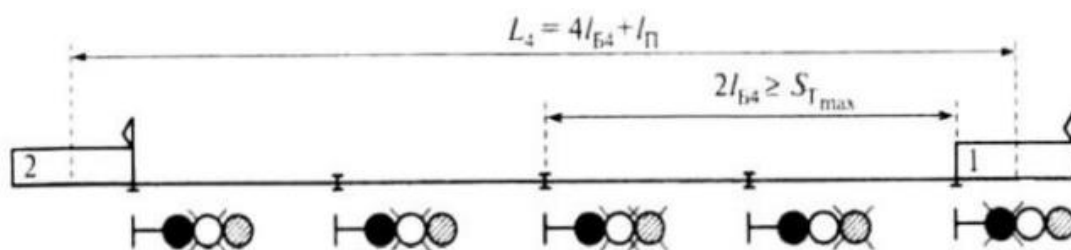


Рисунок 3.2 – Чотиризначне автоблокування

3.2. Пропускна здатність перегону при застосування координатної системи інтервального регулювання

Інший метод за допомогою якого можливо регулювати рух поїздів – це застосування координатної системи інтервального регулювання (КСІР). На відміну від автоблокування ця система контролює рух поїзда не за фіксованими межами блок-ділянок, а динамічно, визначаючи відстань до хвоста попереднього поїзда.

Крім того, ці системи розраховують мінімально безпечну відстань між поїздами, враховуючи їхні індивідуальні гальмівні характеристики, що забезпечує більш гнучку та безпечну експлуатацію залізниці.

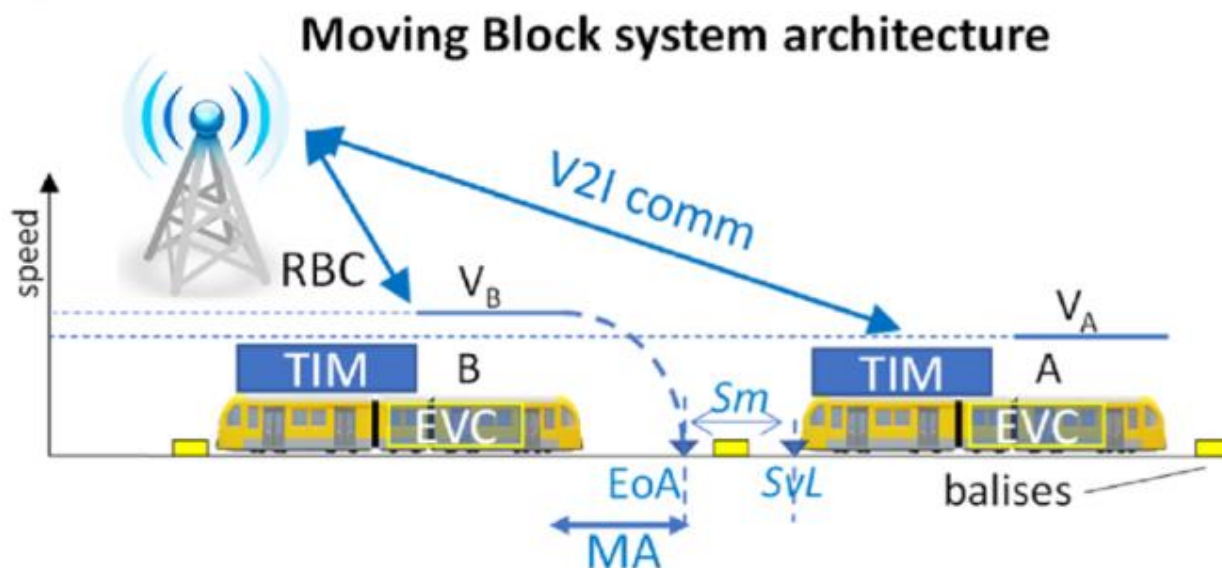


Рисунок 3.3 – Принцип роботи координатної системи інтервального регулювання рухом поїзду

Координатні системи мають наступну класифікацію:

- В залежності від способу керування: централізовані, децентралізовані, комбіновані;
- За видом зв'язку між станційним та локомотивним обладнанням: з радіозв'язком, з індуктивним зв'язком та з супутниковим радіозв'язком;
- За джерелами даних про рух поїзда: з радіолокаційними локомотивними датчиками інформації, з лініями індуктивного зв'язку, з колійними датчиками інформації, з радіонавігаційними супутниковими датчиками інформації;

Формула для знаходження часу мінімального міжпоїзного інтервалу для координатної системи має вигляд:

$$I_{\text{коорд.}} = t_z + 0.06 \frac{l_{\text{вирт.}} + l_n}{V_{\text{cp}}}, \quad (3.6)$$

де t_z – час гальмування, хв; $l_{зах.}$ – довжина захисної блок-ділянки, м; l_n – довжина поїзда, м; V_{cp} – середня швидкість поїзда на обчислювальній ділянці км/год.

При розрахунках мінімального міжпоїзного інтервалу повинна виконуватися умова: мінімальна допустима відстань між двома поїздами має бути не менше гальмівного шляху та віртуальної загороджувальної ділянки. При цьому треба враховувати:

- похибку визначення довжини поїзда Δl_n , м;
- похибку визначення координати голови поїзда $\Delta l_{z.n.}$, м;
- час спрацювання пристроїв АЛС $t_{АЛС}$ (для системи АЛСН $t_{АЛС} \approx 5$ с);
- час підготовки для гальмування t_n (у пневматичних гальм $t_n \approx 12$ с, у електропневматичних гальм $t_n \approx 2$ с);
- відсутність інформації про профіль колії в місці гальмування Δt_z , с;
- коефіцієнти переводу системи СВ $\left[\frac{V}{a} \right] = \frac{км \cdot с^2}{год \cdot м} = \frac{1000 \cdot хв^2}{60 \cdot 60 \cdot 60 хв \cdot м} = 0.0046 хв$

та 0.06 – коефіцієнт переводу з 1 км/год в 1 м/хв;

Час гальмування можливо визначити за формулою:

$$t_z = \frac{V}{a}, \quad (3.7)$$

де V – початкова швидкість поїзда, км/год; a – прискорення гальмування, $с^2 / м$.

Отже враховувавши всі умови ми отримуємо наступну формулу для розрахунку мінімального міжпоїзного інтервалу в координаційні системі:

$$I_{коорд.} = 0.0046 \frac{V}{a} + 0.06 \frac{l_{зах.} + l_n + \Delta l_n + 2\Delta l_{z.n.}}{V} + t_{АЛС} + t_n + \Delta t_z; \quad (3.8)$$

Формула пропускної здатності перегону аналогічна формулі для тризначного та чотиризначного автоблокування (3.5) [14].

Звертаючись до формул (3.2), (3.4), (3.5), та (3.8) і програмного засобу MATLAB проведений аналіз пропускної здатності перегону для різних типів поїздів коли застосовують тризначне, чотиризначне автоблокування та координатній системі

інтервального регулювання. З висновками можливо ознайомитися на табл. 3.1 і рис. 3.4 та 3.5.

При виконанні обчислені були обрані наступні вихідні дані:

$l_{БП} = 1050 - 2350$ м - змішана ділянка руху з пасажирськими, приміськими та вантажними поїздами; $a = 1 \text{ м/с}^2$; $l_{зах.} = 200$ м; $\Delta l_n = 10$ м; $\Delta l_{з.п.} = 15$ м; $t_{АЛС} = 5 \text{ с} = 0.0833 \text{ хв}$; $t_n = 12 \text{ с} = 0.2 \text{ хв}$; $\Delta t_{з.} = 0.7 \text{ хв}$.

Характеристики поїздів:

- Пасажирський поїзд:

- Довжина вагону – $l_{в.пас.} = 26.6$ м;
- Кількість вагонів – $n_{в.пас.} = 15$;
- Гальмівний шлях – $S_{з.пас.} = 800$ м;
- Швидкість руху – $V_{пас.} = 65$ км/год;
- Довжина поїзда – $l_{п.пас.} = l_{в.пас.} \cdot n_{в.пас.} = 26.6 \cdot 15 = 399$ м;

- Приміський поїзд:

- Довжина вагону – $l_{в.прим.} = 26.6$ м;
- Кількість вагонів – $n_{в.прим.} = 10$;
- Гальмівний шлях – $S_{з.прим.} = 400$ м;
- Швидкість руху – $V_{прим.} = 65$ км/год;
- Довжина поїзда – $l_{п.прим.} = l_{в.прим.} \cdot n_{в.прим.} = 26.6 \cdot 10 = 266$ м;

- Вантажний поїзд:

- Довжина вагону – $l_{в.вант.} = 15.7$ м;
- Кількість вагонів – $n_{в.вант.} = 50$;
- Гальмівний шлях – $S_{з.вант.} = 1200$ м;

- Швидкість руху – $V_{\text{вант.}} = 40 \text{ км/год}$;
- Довжина поїзда – $l_{\text{н.прим.}} = l_{\text{в.вант.}} \cdot n_{\text{в.вант.}} = 15.7 \cdot 50 = 785 \text{ м}$;

Розрахунок мінімального міжпоїзного інтервалу для пасажирського поїзду з використанням тризначного автоблокування, за основу був обраний гальмівний шлях пасажирського потягу:

$$I_{3_{\text{пас.}}} = 0.06 \frac{3 \cdot S_{\text{з.пас.}} + l_n}{V_{\text{сп}}} = 0.06 \frac{3 \cdot 800 + 399}{65} = 2.5837 \text{ хв};$$

Розрахунок пропускної здатності пасажирського поїзду при тризначному автоблокуванні:

$$N_{3_{\text{пас.}}} = \frac{1440}{I_{3_{\text{пас.}}}} = \frac{1440}{2.5837} = 557;$$

Розрахунок мінімального міжпоїзного інтервалу для пасажирського поїзду з використанням координатної системи регулювання інтервального руху поїздів, за основу була обрана довжина ділянки:

$$\begin{aligned} I_{\text{коорд.пас.}} &= 0.0046 \frac{V}{a} + 0.06 \frac{l_{\text{зах.}} + l_n + \Delta l_n + 2\Delta l_{\text{з.п.}}}{V} + t_{\text{АЛС}} + t_n + \Delta t_2 = \\ &= 0.0046 \frac{65}{1} + 0.06 \frac{200 + 399 + 10 + 2 \cdot 15}{65} + 0.0833 + 0.2 + 0.7 = 1.87215 \text{ хв}; \end{aligned}$$

Розрахунок пропускної здатності пасажирського поїзду при чотиризначному автоблокуванні:

$$N_{\text{коорд.пас.}} = \frac{1440}{I_{\text{коорд.пас.}}} = \frac{1440}{1.87215} = 769.$$

З результатами розрахунків для усіх типів поїздів, в залежності від системи інтервального руху, можливо ознайомитись у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Розрахунки міжпоїзних інтервалів та пропускної здатності перегону в залежності від системи інтервального регулювання для різних типів поїздів

Вид системи інтервального руху	Тип поїзда	Довжина поїзда l_n , м	Швидкість руху поїзда V_n км/год	Мінімальний міжпоїзний інтервал (довжина блок-ділянки для пас. поїзда), хв	Мінімальний міжпоїзний інтервал (довжина блок-ділянки для прим. поїзда), хв	Мінімальний міжпоїзний інтервал (довжина блок-ділянки для вант. поїзда), хв	Пропускна здатність (довжина блок-ділянки для пас. поїзда)	Пропускна здатність (довжина блок-ділянки для прим. поїзда)	Пропускна здатність (довжина блок-ділянки для вант. поїзда)
Тризначна система автоблокування	пасажирський	399	65	2.5837	1.476	3.6914	557	975	390
	приміський	266	65	2.4609	1.3532	3.5686	585	1064	403
	вантажний	785	40	4.7775	2.9775	6.5775	301	483	218
Координатна система	пасажирський	399	65	1.8722			769		
	приміський	266	65	1.7494			823		
	вантажний	785	40	2.7048			532		

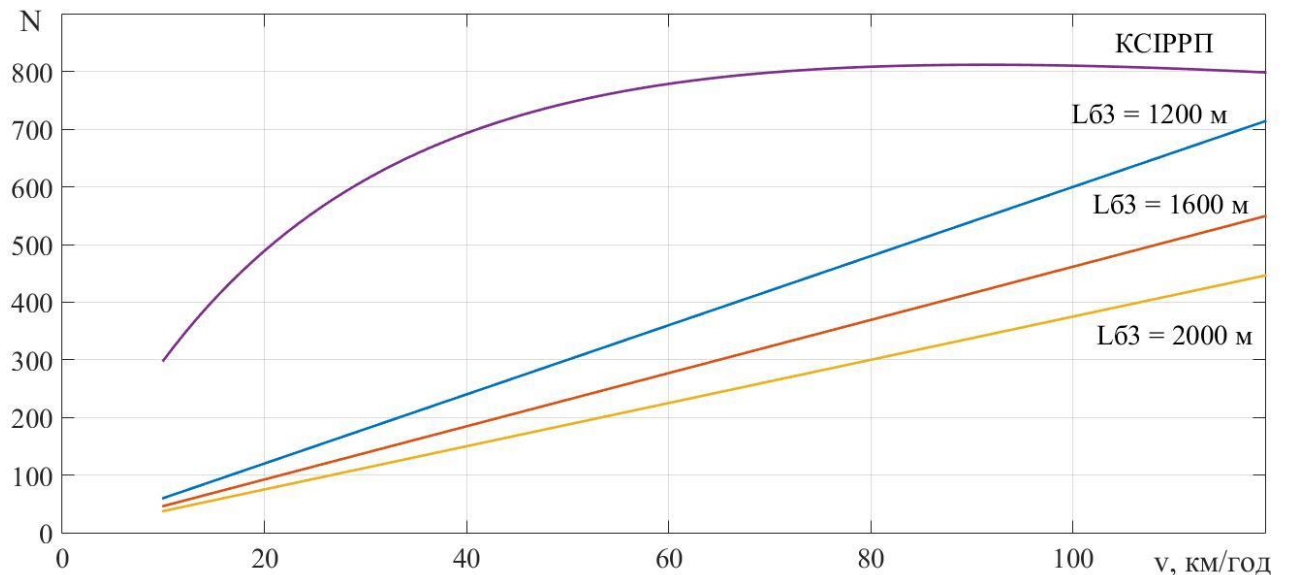


Рисунок 3.4 – Залежність пропускної здатності перегону від швидкості руху поїзда для різних систем інтервального регулювання

Проведемо аналіз рис. 3.4, де зображено як пропускна здатність перегону залежить від швидкості руху потяга для різних систем інтервального регулювання руху поїздів. Під час обчислення було зроблено порівняння тризначної системи автоблокування для різних довжин блок-ділянок та координатної системи інтервального регулювання. З отриманої інформації зроблений висновок, що в тризначній системі автоблокування: чим більше швидкість руху поїзда, тим більше його пропускна здатність. При цьому, довжина блок ділянки також впливає на пропускну здатність перегону, тобто при збільшенні довжини, зменшується пропускна здатність перегону. Координатна система на відміну двох попередніх не має лінійної залежності від швидкості, що надає нам можливість використовувати різні швидкості руху не витрачаючи високі значення пропускної здатності перегону.

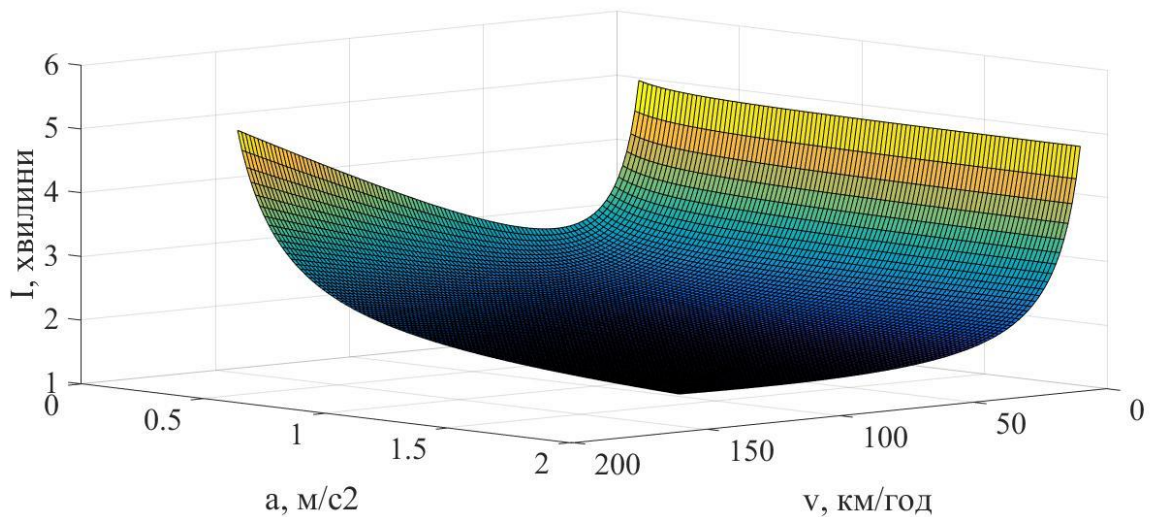


Рисунок 3.5 – Залежність міжпоїзного інтервалу від прискорення гальмування швидкості руху та швидкості руху для координатної системи регулювання інтервальним рухом поїздів

Відповідно до рис. 3.5, час, який повинен пройти між двома поїздами, залежить від їхньої швидкості та здатності швидко зупинитися. Якщо поїзди їдуть швидко і можуть швидко загальмувати, то інтервал між ними може бути меншим. Це дозволяє пропускати більше поїздів за той самий час. Однак, якщо поїзд їде швидко, але гальмує повільно, то відстань між ним і наступним поїздом потрібно збільшити, щоб уникнути зіткнення. Отже це дозволяє ефективно використовувати координатну систему на ділянці зі змішаним рухом поїздів.

3.3. Системи інтервального регулювання з віртуальними блок-ділянками

Сучасним способом керування системи інтервального руху на залізниці є застосування віртуальних блок-ділянок. Ця система широко розповсюджена в Європі на рівні ERTMS 3 і може бути впроваджена на залізницях України. Завдяки більш гнучкому розподілу поїздів у часі і просторі система надає можливість кратно підвищувати пропускну здатність перегонів. Основна концепція технології полягає у заміні фіксованих блок-ділянок, що обмеженні світлофорами, на віртуальні блок-ділянки. Таким чином ми зменшуємо відстань між поїздами, бо

робимо виміри не між фіксованими межами, як було раніше, а за віртуальними, які змінюються динамічно. Внаслідок чого можливо більше точне планування руху поїздів і більше оптимальне використання колії.

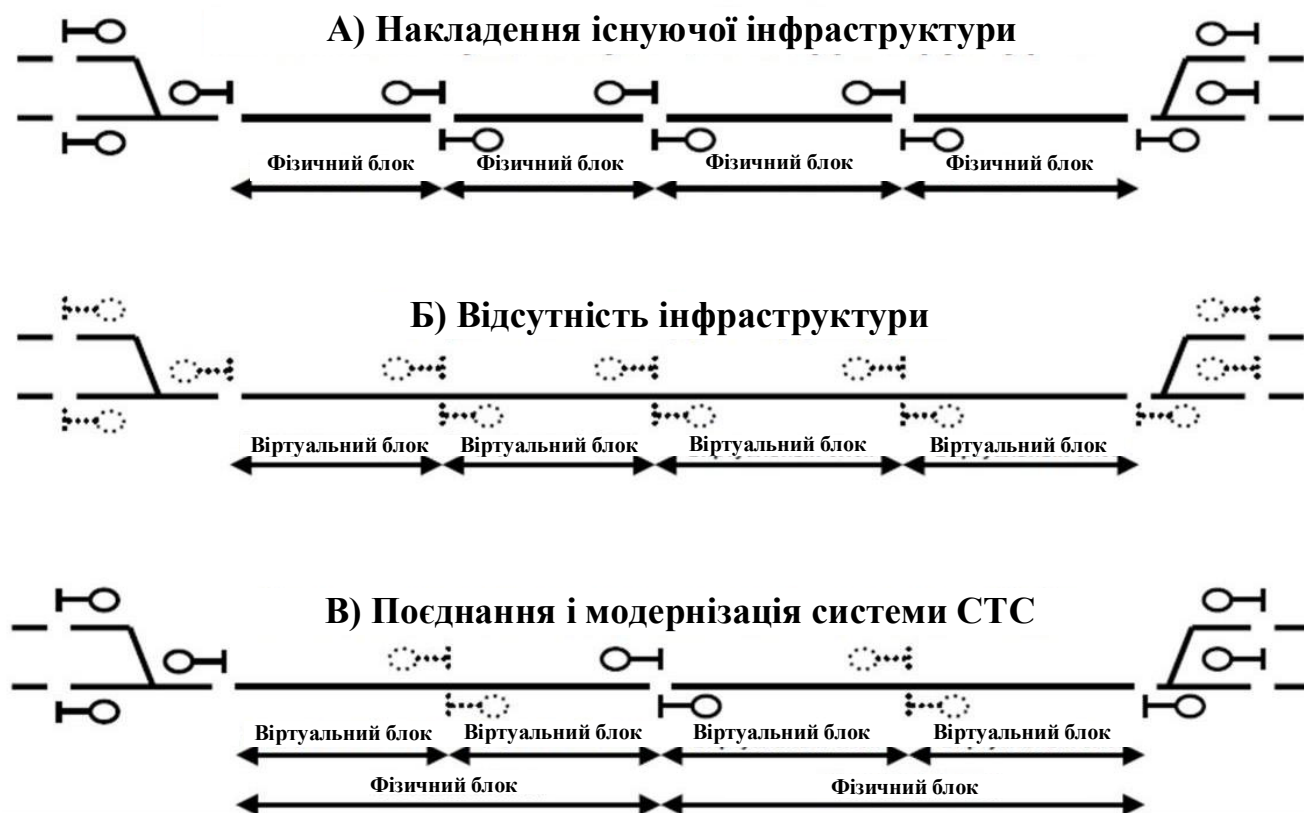


Рисунок 3.6 – Система інтервального регулювання руху поїздів: а) без віртуальних блок-ділянок; б) з віртуальними блок-ділянками; в) комбінована

Використання віртуальних блок-ділянок можливо і з фіксованими, що дозволяє впроваджувати систему на колії зі старим обладнанням. Така будова має назву система комбінованих віртуальних блок-ділянок. Ідея полягає в тому, що залишається частина фіксованих блок-ділянок, а між ними використовуються віртуальні блок-ділянки. Перевагою застосування концепції є більш точне визначення положення поїзда, при оптимізації його руху віртуальними блок-ділянками [11].

3.4 Висновки за розділом

В традиційних системах трьохзначного та чотирьохзначного автоблокування залізничний перегін розділяється на фіксовані блок-ділянки, на границях яких розташовуються світлофори. Довжини блок-ділянок обирають не менше ніж гальмівний шлях поїзда. При цьому розрахунки виконуються з урахуванням профілю колії для поїзда, що має найбільший гальмівний шлях. Таким чином, при використанні автоблокування з фіксованими блок-ділянками мінімально можливий за умовами безпеки міжпоїзний інтервал забезпечується лише для одного (розрахункового) типу поїздів.

Координатні системи інтервального регулювання дозволяють реалізувати мінімально можливі за умовами безпеки міжпоїзні інтервали для всіх типів поїздів та забезпечують максимально можливу пропускну спроможність залізничних ліній. Проте в таких системах не використовуються традиційні пристрої контролю вільності колійних ділянок, а безпека руху поїздів суттєво залежить від надійності мережі цифрового радіозв'язку.

На нашу думку перспективною є гібридна система інтервального регулювання, в якій поєднуються фізичні та віртуальні блок-ділянками. При цьому границі фізичних блок-ділянок потрібно визначати для поїздів з найбільшим гальмівним шляхом. Для інших типів поїздів потрібно вводити додаткові віртуальні блок-ділянки. Впровадження такої системи в Україні дозволить суттєво підвищити пропускну спроможність залізничних ліній, зменшити експлуатаційні витрати за рахунок скорочення колійних пристроїв автоматики, забезпечити сумісність європейських та українських систем керування рухом поїздів.

РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ СИСТЕМИ ЦИФРОВОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

4.1 Представлення базової станції мобільного зв'язку як системи масового обслуговування

Сучасний світ неможливо уявити без мобільного зв'язку. Його якість та доступність напряму залежать від ефективної роботи базових станцій. Аби зрозуміти, як функціонують ці складні системи, варто заглибитися в теорію систем масового обслуговування (СМО).

Механізми обслуговування чималого числа клієнтів (запитів), що обмежені числом сервісів являються математичною моделлю, широко відомою як система масового обслуговування. Основним видом застосування цих систем є аналіз різноманітних подій, від роботи магазинів до функціонування телефонних мереж.

Уявімо базову станцію як касу в магазині, а абонентів – як клієнтів. Кожен абонент, який здійснює дзвінок, відправляє повідомлення або просто підключений до мережі, фактично звертається до базової станції з певною вимогою. Сама станція, зі своїми обмеженими ресурсами (частотами, каналами), виконує роль касира, обслуговуючи ці запити. Якщо навантаження на станцію високе, виникають черги, як і в магазині під час пікових годин.

Інтенсивність трафіку, тобто кількість дзвінків та інших запитів за одиницю часу, є важливим показником навантаження на станцію. Дисципліна обслуговування визначає, в якому порядку обробляються запити: за принципом "перший прийшов – перший обслуговується", пріоритетності або випадково. Наприклад всі системи залізнично радіозв'язку в тому числі і FRMCS на відміну від комерційних є пріоритетними, тобто при перевантаженні каналу в першу чергу обслуговується найважливіші види зв'язку, такі як передача різних команд керування або диспетчерський зв'язок, а після цього менш пріоритетні – ремонтно-оперативний зв'язок. Час обслуговування – це час, необхідний для обробки одного

запиту, а кількість каналів обслуговування визначає, скільки абонентів може бути обслуговано одночасно.

Ефективність роботи базової станції залежить від багатьох факторів. Це і інтенсивність трафіку, і розподіл часу обслуговування, і кількість доступних каналів, і навіть порядок обслуговування абонентів. Наприклад, якщо кількість каналів недостатня, система може перевантажитися, що призведе до погіршення якості зв'язку або до блокування виклику. В протилежному випадку відбувається нерациональне використання ресурсів.

Схематичне зображення базової станції, як СМО представлено на рис. 4.1

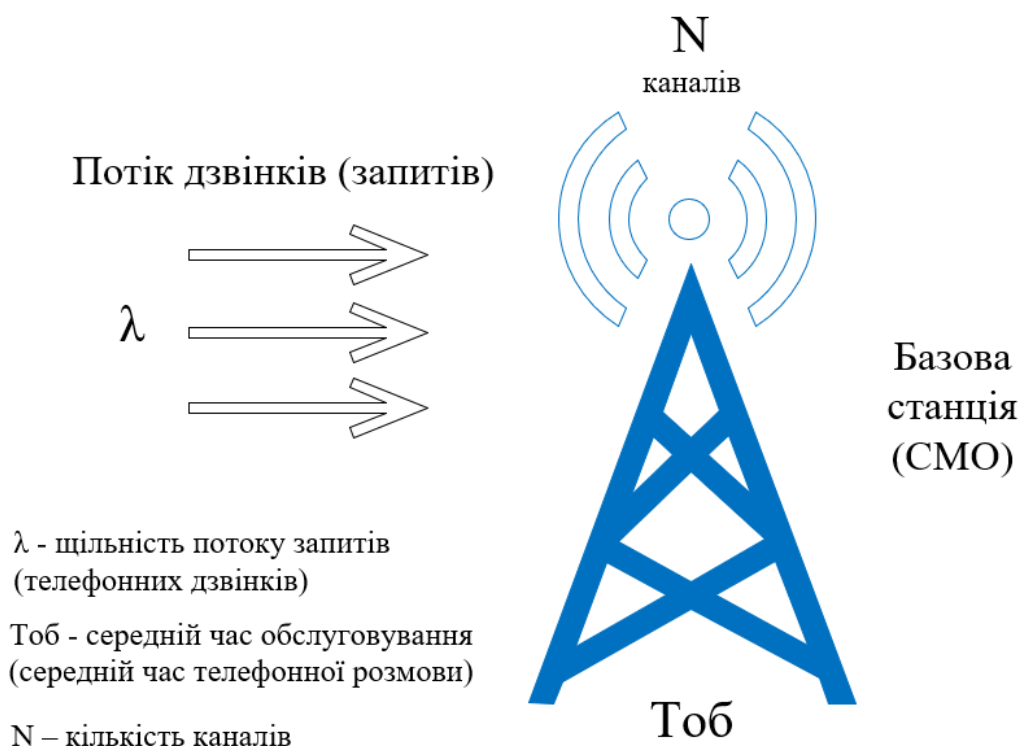


Рисунок 4.1 – Схематичне зображення базової станції, як СМО

Імовірність блокування виклику можливо розрахувати за формулою Ерланга:

$$P_{\text{бл}} = \frac{A^N / N!}{\sum_{k=0}^N A^k / k!}; \quad (4.1)$$

де N – число каналів базової станції; k – індекс; A – навантаження базової станції, яке знаходиться за формулою:

$$A = \lambda \cdot T_{об} \text{ Ерл}; \quad (4.2)$$

Розглядаючи базову станцію крізь призму систем масового обслуговування, ми отримуємо потужний інструмент для аналізу її роботи та оптимізації. Це дозволяє забезпечити високу якість мобільного зв'язку та задовольнити потреби користувачів. Розуміння цих принципів є ключовим для розробки ефективних мобільних мереж майбутнього [16].

4.2 Розрахунок кількості каналів базової станції FRMCS

Система мобільного зв'язку FRMCS (Future Railway Mobile Communication System) – це сучасна система, яка розробляється міжнародним союзом залізниць (UIC), використовуючи сучасну базу стандартів 4G та 5G, для заміни застарілого обладнання GSM-R, що працює за стандартом 2G. В Україні зараз дуже поширений стандарт LTE (4G), тому розрахунки будуть виконані до базової станції мобільного зв'язку FRMCS, яка працює на даному стандарті.

Стандарт LTE (Long Term Evolution) – це сучасний стандарт бездротового високошвидкісного зв'язку. Він відіграє важливу роль у розвитку мобільних технологій. Стандарт для системи FRMCS працює на декількох діапазонах частот, що були прийняті європейською комісією:

1) 874,4 – 880 МГц та 919,4 – 925 МГц, коли застосовують парні частоти (прийом та передача інформації в різних смугах), які мають ширину частотного діапазону 5,6 МГц.

2) 1900 – 1910 МГц, коли використовують непарні частоти (приймання та передавання даних в одній смузі частот з різними часовими проміжками), ширина частотного діапазону відповідає 10 МГц [17].

У стандарті LTE кадр представлений, як основна одиниця часу, протягом якої відбувається передача даних. Він поділяється на менші частини для ефективного використання частотного спектру та синхронізації передавачів і приймачів. Його структура складається з: ресурсних блоків – основні одиниці, на які розподіляються ресурси (частота і час); піднесучі – окремі частотні компоненти, на які модулюється сигнал, їх сукупність в межах ресурсного блоку формує його ширину смуги;

символи – найменша одиниця даних, яка передається у піднесучій за один інтервалу часу; субкадри – елементи, що використовуються для різних типів передачі (управління, дані та інші).

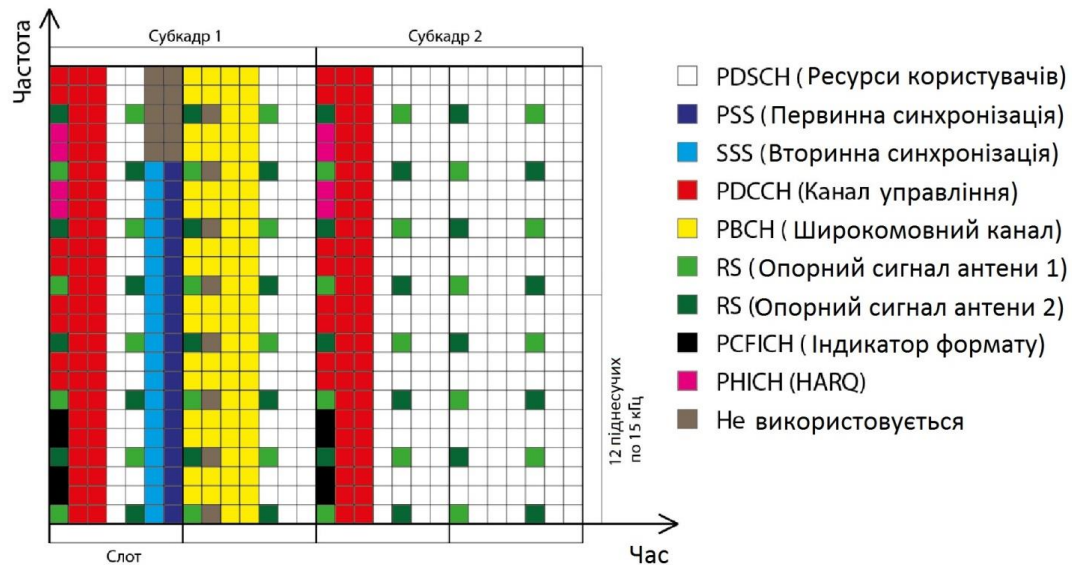


Рисунок 4.2 – Структура кадру LTE

Для ефективного використання частотного спектру, він розбивається на дискретні одиниці – ресурсні блоки. Кожен блок містить 12 ортогональних піднесучих, що займають смугу 15 кГц. Загальна ширина ресурсного блоку таким чином становить: $\Delta f_k = 12 \cdot 15 = 180$ кГц. Це дозволяє гнучко розподіляти ресурси між користувачами мережі [18].

Розрахунок кількості телекомунікаційних каналів (ресурсних блоків) в системі FRMCS відбувається за наступною формулою:

$$N_k = \frac{\Delta F}{\Delta f_k} = \frac{5,6 \cdot 10^6}{180 \cdot 10^3} = 31,1 \text{ (31 канал);} \quad (4.3)$$

де $\Delta F = 5,6$ МГц – ширина частотного діапазону в стандарті FRMCS;

$\Delta f_k = 180$ кГц – ширина одного каналу (ресурсного блоку);

В системах мобільного зв'язку використовують кластерну структуру для запобігання взаємних завад. В системі FRMCS кластер трьохелементний, отже для знаходження кількості каналів для однієї базової станції звертаємось до формули:

$$Nk_{1cm.} = \frac{Nk}{N_{кл.}} = \frac{31}{3} = 10,3 \text{ (10 каналів);} \quad (4.4)$$

де $N_{кл.} = 3$ – розмір кластеру в мережі FRMCS;

Через особливість стандарту LTE в одному каналі організується 2 канали трафіка, тому кількість каналів трафіку для однієї базової станції знаходимо за формулою:

$$Nktr_{1cm.} = Nk_{1cm.} \cdot Ntr_1 = 10 \cdot 2 = 20 \text{ каналів;} \quad (4.5)$$

де $Ntr_1 = 2$ – число каналів трафіку для одного каналу LTE.

4.3 Моделювання базової станції без пріоритетності викликів

Створимо модель базової станції мобільного зв'язку, як системи масового обслуговування без пріоритетності викликів за допомогою програмного засобу MATLAB.

Модель має наступні вихідні дані:

- кількість експериментів, $N = 100$;
- кількість каналів, $m = Nktr_{1cm.} = 20$;
- час закінчення моделювання, $T_{кін} = 1000$ хв;
- час обслуговування однієї заявки, $t_z = 2$ хв;
- середня кількість абонентів за хвилину, $a = 5 - 15$;

З алгоритмом моделювання базової станції мобільного зв'язку без пріоритетності викликів можливо ознайомитись на рис. 4.2.

Алгоритм починається з завдання вихідних даних. Після того, ми визначаємо номер експерименту j . Починаючи експеримент, ми вважаємо, що усі канали вільні, і заявок ще не надходило, тобто $T_1 = 0$ (момент часу надходження першої заявки) та $t_1, t_2 \dots t_n = 0$ (час звільнення 1, 2... n каналів). Наступним кроком є надходження першої заявки k_1 і відбувається перевірка умови: $T_k < T_{кін}$ – контролю часу моделювання, де T_k – це час надходження будь-якої заявки. Якщо час закінчення моделювання більше, тоді визначається номер каналу i та перевіряється його

вільність з використанням умови: $t_1 \leq T_k$. При вільності каналу ми додаємо до нього час його заняття ($t_n = T_k + t_z$) і в лічильнику виконаних заявок збільшуємо значення ($Z_{вук} = Z_{вук} + 1$). Якщо ж канал зайнятий і умова ($t_1 \leq T_k$) не виконується, тоді обирається наступний канал з перевіркою, що він не останній ($i = m$). При умові, що канал не останній, повертаємось до умови, чи перевищує час звільнення цього каналу, час виконання заявки ($t_n \leq T_k$). Якщо ж канал був останнім, тоді збільшуємо значення лічильника не виконаних заявок ($Z_{відм} = Z_{відм} + 1$). Далі, визначившись з вільністю каналів, реалізовується експоненціальна величина tau , яка працює за експоненціальним законом розподілу та окреслює інтервал часу між надходженням двох заявок. І відповідно до цього, з'ясовується час надходження наступної заявки ($T_{k+1} = T_k + tau$). Після цього, відбувається перехід до нової заявки і перевірка умови $T_k < T_{кин}$, яка відповідає за контроль часу моделювання, тобто алгоритм з наступною заявкою повторюється, як було у випадку першої заявки. Якщо ж час закінчення моделювання менше (перевірка умови $T_k < T_{кин}$), тоді лічильник експериментів збільшується ($j = j + 1$) і починається наступний експеримент. Згодом відбувається контроль кількості експериментів ($j \leq N$). Коли ще не всі експерименти завершилися, алгоритм повторюється, у випадку з закінченням усіх експериментів, відбувається розрахунок середньої кількості заявок, що виконується ($S_{вук} = \frac{1}{N} \sum_j Z_{вук j}$) та не виконується ($S_{відм} = \frac{1}{N} \sum_j Z_{відм j}$).

Отримуються аналітичні дані та таким чином алгоритм завершується [19].

Оцінити імовірність блокування виклику за допомогою імітаційного моделювання можливо за формулою:

$$P_{\text{бл}} = \frac{S_{\text{відм}}}{S_{\text{вук}} + S_{\text{відм}}}; \quad (4.6)$$

де $S_{\text{відм}}$ – середня кількість заявок, що не виконуються; $S_{\text{вук}}$ – середня кількість заявок, що виконуються;

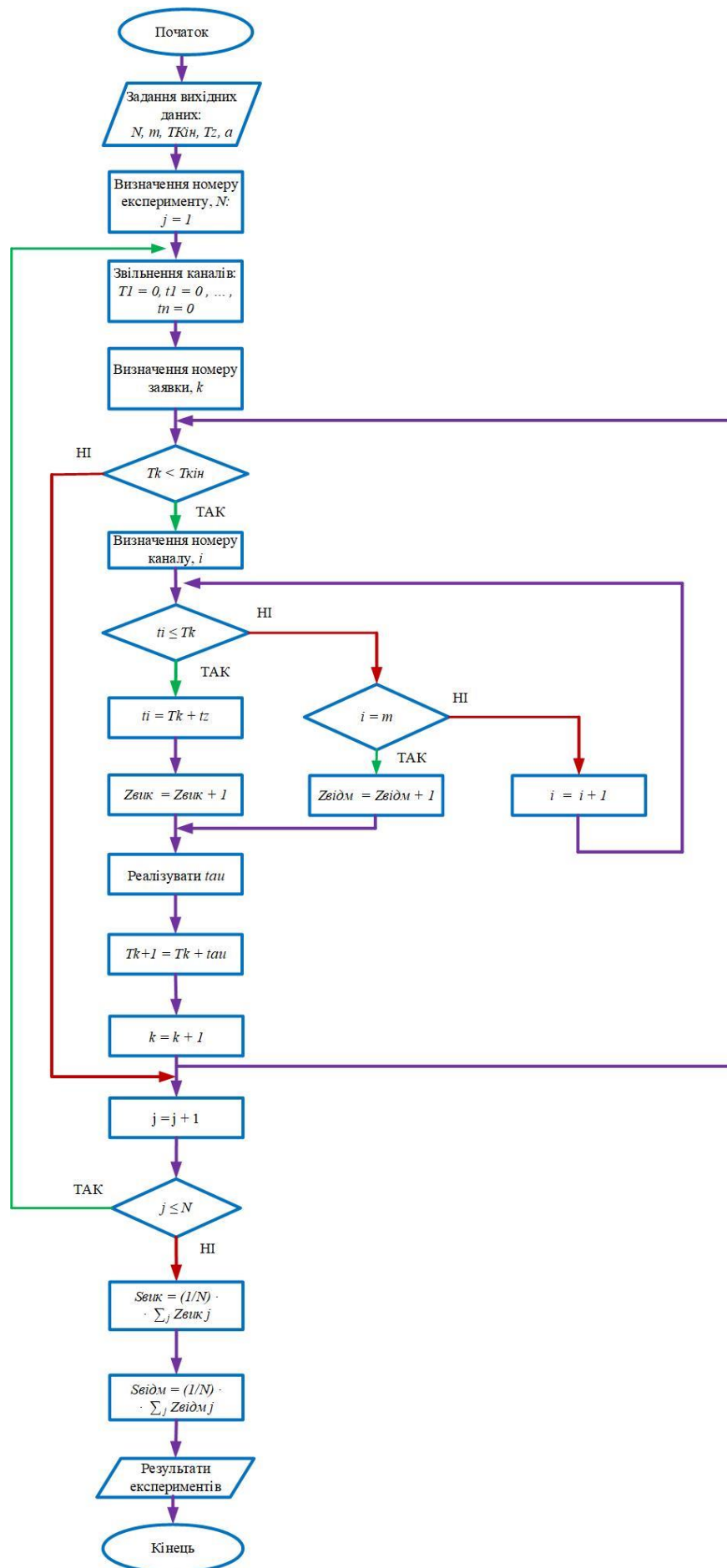


Рисунок 4.3 – Алгоритм моделювання базової станції мобільного зв'язку

Зробимо порівняння нашої моделі з розрахунковою. Для цього, використовуючи формулу Ерланга (4.1) знайдемо імовірність блокування виклику для системи СМО з найпростішим потоком заявок. При виконанні розрахунків використовуємо наступні дані: $N = 20$; $t_z = 2$ хв; λ – від 5 до 15 викликів за хвилину;

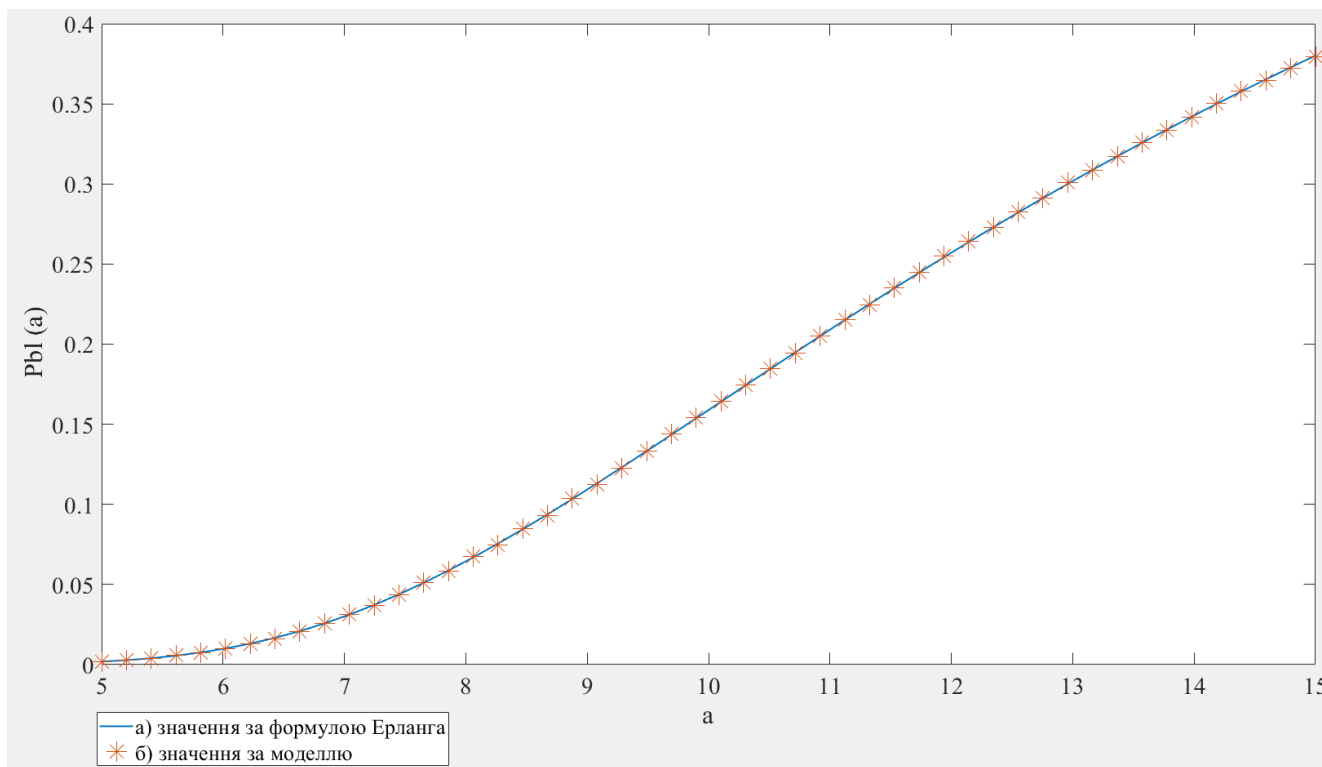


Рисунок 4.4 – Графік порівняння ймовірності блокування розрахованих за:
а) формулою Ерланга; б) побудованою імітаційною моделлю

З графіку можливо зробити висновок, що створена імітаційна модель за алгоритмом має майже однакові дані з розрахунковими. Це підтверджує адекватність розробленої імітаційної моделі.

Використовуючи імітаційну модель базової станції мобільного зв'язку, як системи масового обслуговування без пріоритетності викликів, побудуємо графік залежності ймовірності блокування від щільності викликів та проведемо оцінку граничної щільності потоку викликів, при якій ймовірність блокування не буде перевищувати 5 % для різного часу обслуговування.

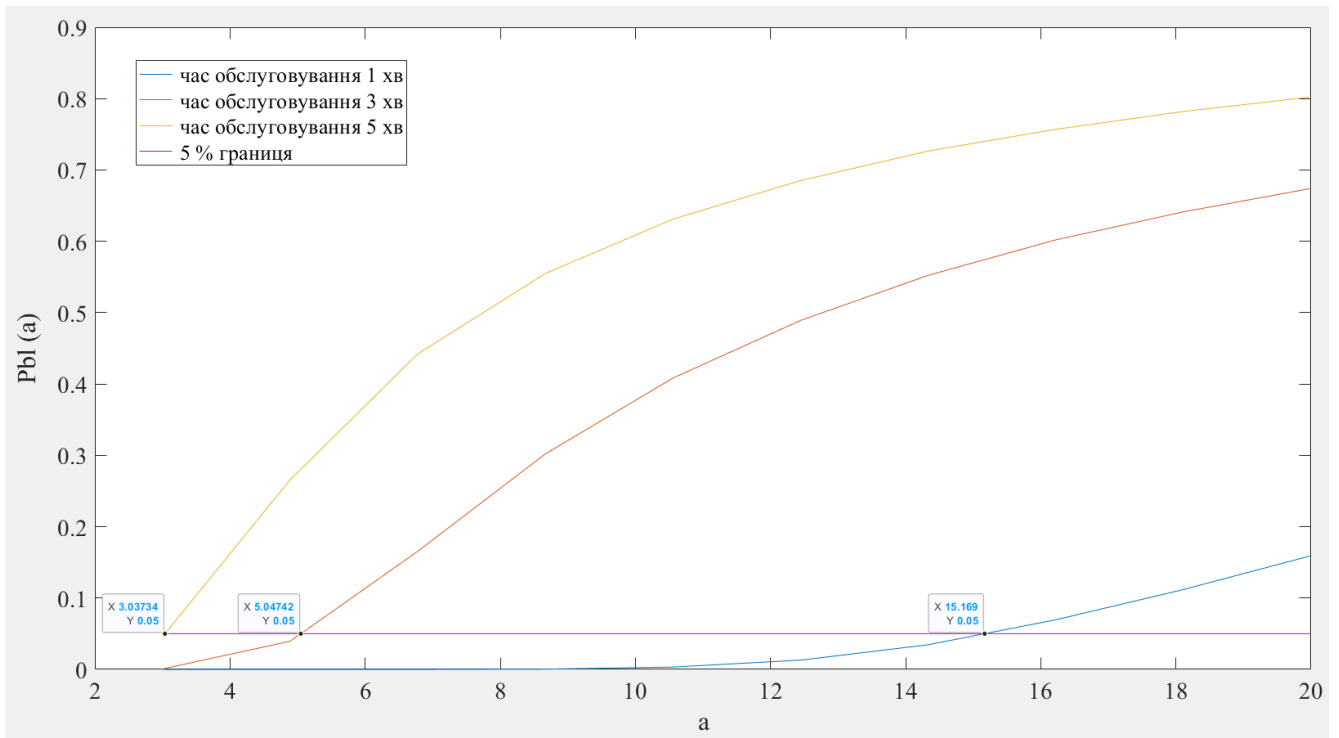


Рисунок 4.5 – Графік залежності імовірності блокування від щільності викликів

Згідно графіку ми бачимо, що при часі обслуговування 1 хв має місце щільність потоку викликів 15 викликів за хвилину, коли досягається імовірність блокування виклику 5%; при часу обслуговуванні 3 хв – щільність 5 викликів за хвилину; а при часі обслуговуванні 5 хв – щільність 3 виклики за хвилину відповідно. Отже, до цього ми бачимо, що щільність викликів та час обслуговування пропорційно відіграють роль у кількості блокування викликів: чим менша щільність викликів, та чим більший час їх обслуговування, тим більша імовірність, що вони не будуть заблокованими.

4.4 Моделювання базової станції з пріоритетністю викликів

Модель базової станції мобільного зв'язку як системи СМО з пріоритетністю викликів, буде працювати наступним чином. На базову станцію поступає два потоки заявок: з низьким та високим пріоритетами. Коли надходить заявка з високим пріоритетом і всі канали зайняті, то здійснюється звільнення каналу за рахунок розриву зв'язку з меншим пріоритетом, для обслуговування заявки з

високим пріоритетом. У моделі базової станції з пріоритетністю є функція пошуку каналу. З алгоритмом роботи функції пошуку каналу можливо ознайомитись на рис. 4.6.

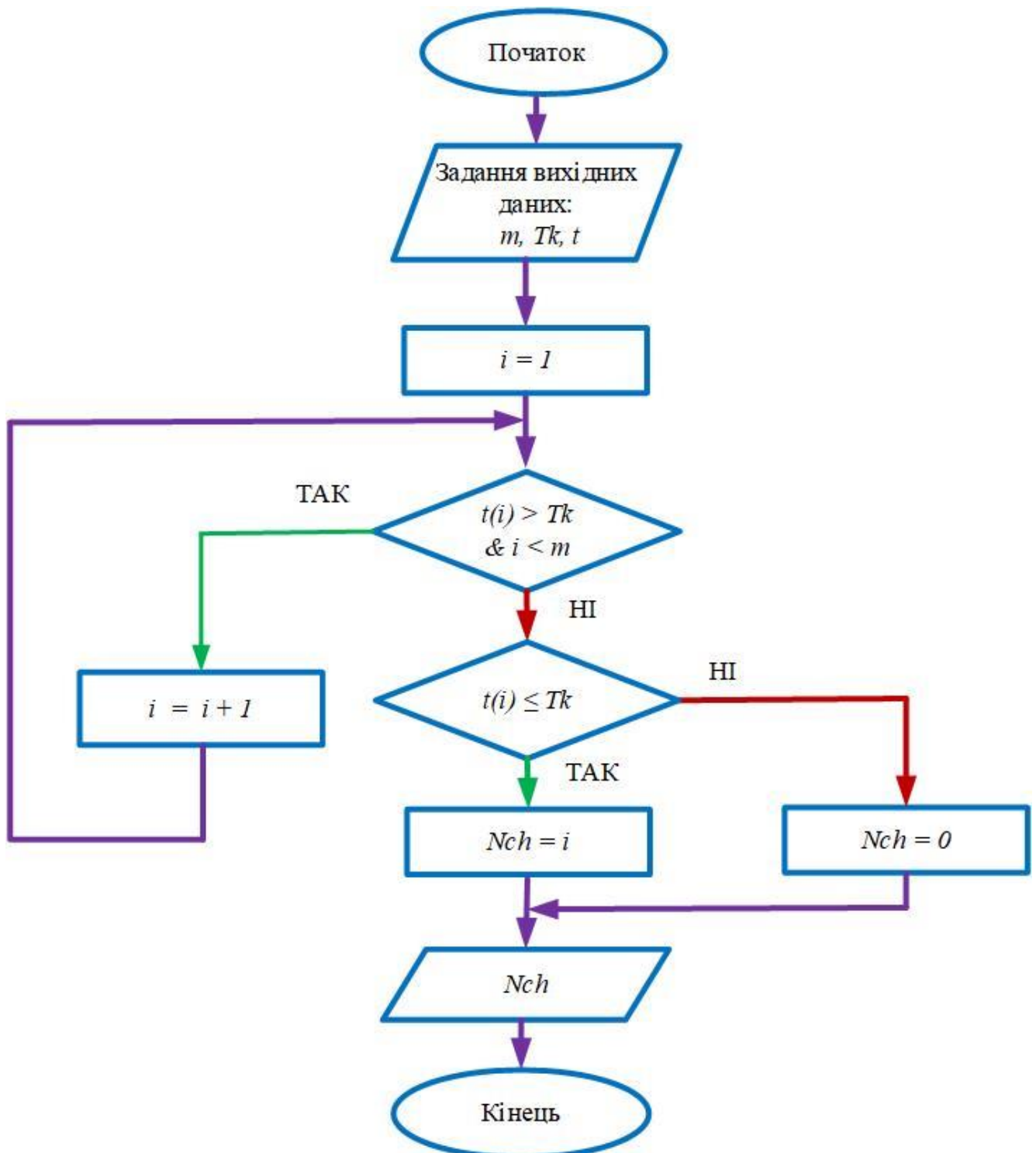


Рисунок 4.6 – Алгоритм роботи функції пошуку вільного каналу (функція search_chanel)

Задача алгоритму полягає у визначенні номеру каналу, який є вільний. Вхідними елементами функції є:

- m – кількість каналів базової станції;
- Tk – час надходження k -ї заявки;
- t – вектор значень t_i , де t_i – час звільнення i -го каналу.

Вихідний аргумент представлений у вигляді:

- Nch – номер вільного каналу; якщо всі канали зайняті, то $Nch = 0$.

Загальний алгоритм, що намальований на рис. 4.7, починається за схожим принципом, як і без пріоритетів, ми задаємо початкові дані: m , Tk_{in} , $tz1$, $tz2$, $a1$, $a2$, де $tz1$ та $a1$ для високого пріоритету, а $tz2$ та $a2$ для низького. Розпочинаємо рахунок експериментів за допомогою змінної N . Потім визначається час коли поступають заявки різних пріоритетів ($Tk1$ – для високого та $Tk2$ – низького відповідно), знаходиться який саме виклик обслуговує канал за пріоритетністю (\bar{t}) та вводиться вектор \bar{p} довжиною m , що набуває лише три значення: 0 – вільний канал, 1 – обслуговує заявку першого пріоритету, 2 – обслуговує заявку 2 пріоритету. До приймання заявок ми приступаємо з нижчого пріоритету, бо якщо немає вільних каналів, то це відразу відмова, на відміну від вищого пріоритету, де в цьому випадку відбувається переривання виклику з низьким пріоритетом для звільнення каналу. Тобто спочатку ми перевіряємо умову $Tk2 < T_{kin}$, де при невідповідності їй ми переходимо для перевірки наявності заявок вищого пріоритету, а у випадку її виконання, шукаємо вільні канали для другого пріоритету за допомогою функції пошуку каналу ($search_channel(m, Tk2, \bar{t})$), алгоритм якої був наведений вище на рис. 4.6. Далі виконується перевірка умови $Nch > 0$, якщо, ні то каналів вільних немає і збільшується лічильник відмов $Z_{відм2} = Z_{відм2} + 1$, якщо ж так, тоді визначаємо час звільнення каналу ($t(Nch) = Tk2 + tz2$) і записуємо у вектор $\bar{p}(Nch) = 2$, що обслуговується заявка другого пріоритету. В цей же час збільшуємо лічильник викликів $Z_{вик2} = Z_{вик2} + 1$. Наступним кроком, через експоненціальну величину $tau2$, знаходимо час надходження заявки з другим пріоритетом наступним чином: $Tk2 = Tk2 + tau2$. Після цих обчислень

розпочинається обслуговування заявок першого пріоритету. Перевіряється умова: $Tk1 < T_{кін}$. Якщо вона дійсна, тоді звертаємося до функції пошуку вільного каналу ($search_chanel(m, Tk1, \bar{t})$).

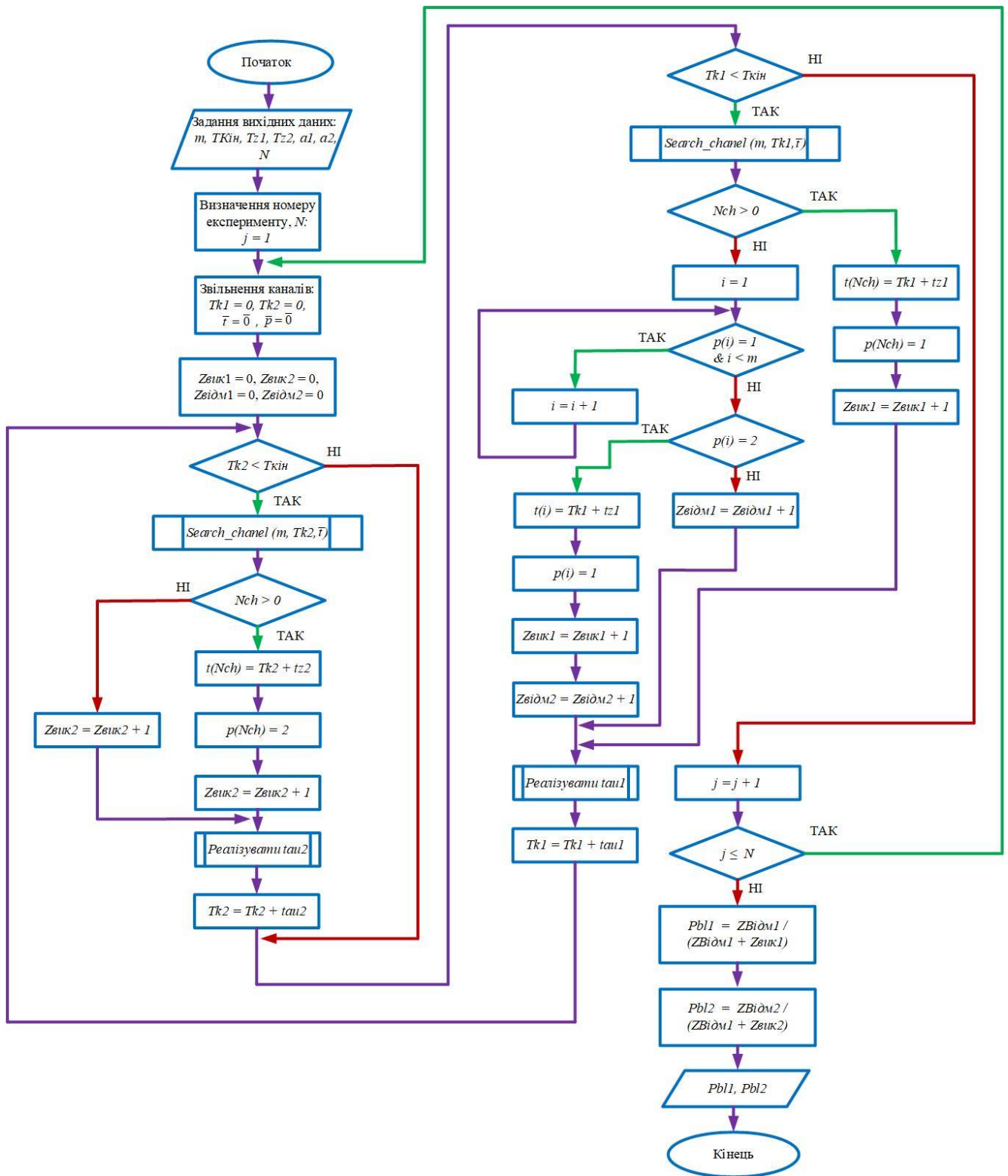


Рисунок 4.7 – Загальний алгоритм моделювання пріоритетної СМО

Далі відбувається контроль умови: $Nch > 0$, при виконанні якої алгоритм як і для другого пріоритету повторюється: тобто знаходиться час звільнення каналу за формулою: $t(Nch) = Tk1 + tz1$ і записується у вектор $\bar{p}(Nch) = 1$, що обслуговується заявка першого пріоритету. Так само, як і минулого разу, збільшуємо лічильник викликів $Z_{вук1} = Z_{вук1} + 1$. Якщо ж умова $Nch > 0$ не виконується, тоді відбувається пошук каналу, який обслуговує заявку нижчого пріоритету. Отже $i = 1$ та перевіряємо умову $p(i) = 1$ і $i < m$, якщо так, тоді переходимо до наступного каналу та перевірки цієї ж умови ($i = i + 1$), якщо ж вона не виконується, то контролюється умова $p(i) = 2$, при не відповідності якій збільшуємо лічильник відмов: $Z_{відм1} = Z_{відм1} + 1$, в протилежному ж випадку знаходимо час звільнення цього каналу $t(i) = Tk1 + tz1$, записуємо у вектор $\bar{p}(Nch) = 1$, що обслуговується заявка першого пріоритету та збільшуємо лічильник викликів $Z_{вук1} = Z_{вук1} + 1$ і лічильник відмов: $Z_{відм2} = Z_{відм2} + 1$. Наступний кроки – це реалізація $tau1$, розрахунок часу надходження заявки з першим пріоритетом наступним чином: $Tk1 = Tk1 + tau1$. В кінці повертаємось до перевірки умови $Tk2 < T_{кин}$. Якщо ж умова $Tk1 < T_{кин}$ не дійсна, то лічильник експериментів збільшується ($j = j + 1$) і починається наступний експеримент. Згодом відбувається контроль кількості експериментів ($j \leq N$). Після закінчення усіх розрахунків відбувається оцінка ймовірності блокування викликів для заявок вищого пріоритету ($Pbl1 = \frac{Z_{відм1}}{Z_{відм1} + Z_{вук1}}$) та нижчого пріоритету ($Pbl2 = \frac{Z_{відм2}}{Z_{відм2} + Z_{вук2}}$). Отримуються результати, а сам алгоритм завершується.

Використовуючи програмний засіб MATLAB, побудуємо графіки ймовірностей блокування від щільності викликів для алгоритму з пріоритетністю викликів. Були обрані наступні вихідні данні:

- кількість експериментів, $N = 100$;
- кількість каналів, $m = 20$;
- час закінчення моделювання, $T_{кин} = 1000$ хв;

- час обслуговування однієї заявки різних пріоритетів, $t_{z1} = 1 - 3$ хв; $t_{z2} = 2$ хв;
- середня кількість абонентів за хвилину у різних пріоритетів, у вищого $a_1 = 3 - 17$, у нижчого $a_2 = 20$.

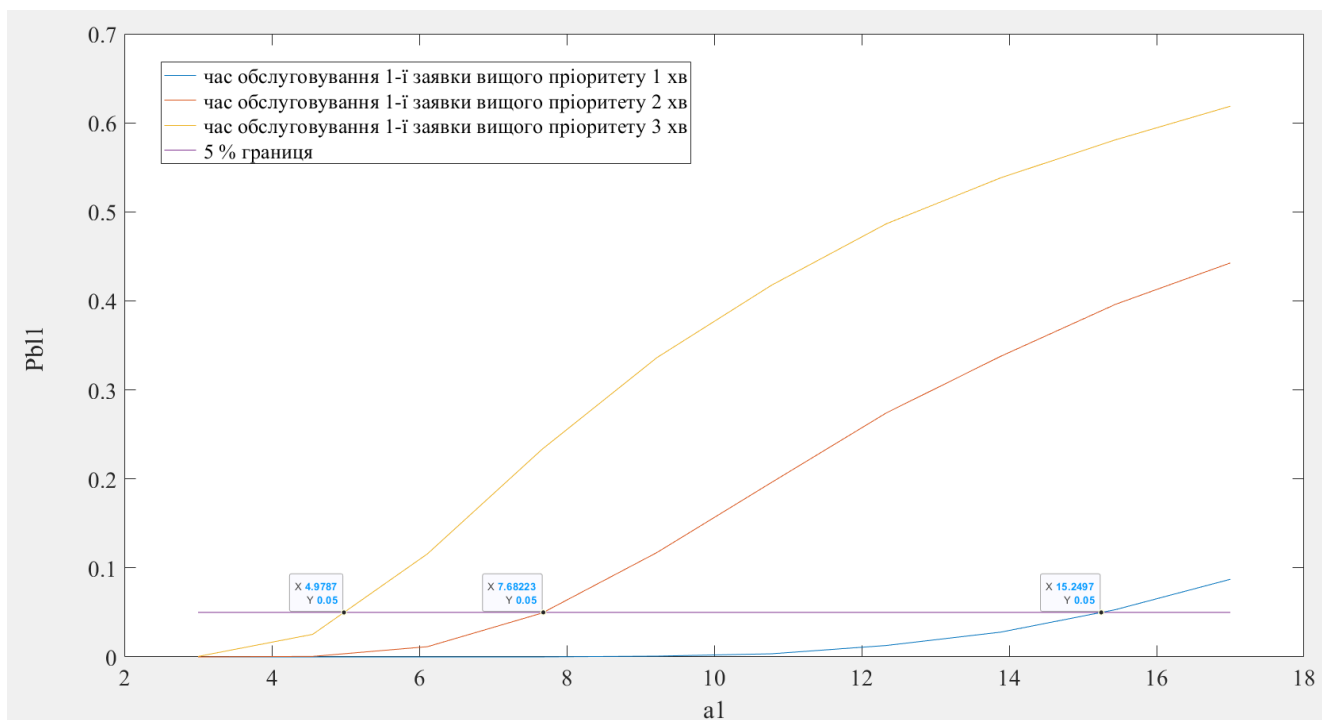


Рисунок 4.8 – Графік залежності ймовірності блокування заявки з вищим пріоритетом від інтенсивності потоку заявок з вищим пріоритетом

Аналіз графіка демонструє, що ймовірність блокування виклику безпосередньо пов'язана з двома факторами: інтенсивністю надходження викликів та тривалістю їх обслуговування. Зокрема, при збільшенні середнього часу обслуговування з 1 до 3 хвилин, необхідна інтенсивність викликів для досягнення 5% ймовірності блокування зменшується з 15 до 5 викликів за хвилину. Це свідчить про обернено пропорційну залежність між цими показниками. Тобто ми отримуємо аналогічний результат, як і не для пріоритетної моделі.

Наступним кроком буде будівництво графіка залежності ймовірності блокування викликів з нижчим пріоритетом від інтенсивності викликів вищого пріоритету.

Вихідні дані:

- кількість експериментів, $N = 100$;
- кількість каналів, $m = 20$;

- час закінчення моделювання, $T_{кин} = 1000$ хв;
- час обслуговування однієї заявки різних пріоритетів, $t_{z1} = 2$ хв; $t_{z2} = 1-3$ хв;
- середня кількість абонентів за хвилину у різних пріоритетів, у вищого $a_1 = 1-5$, у нижчого $a_2 = 3$.

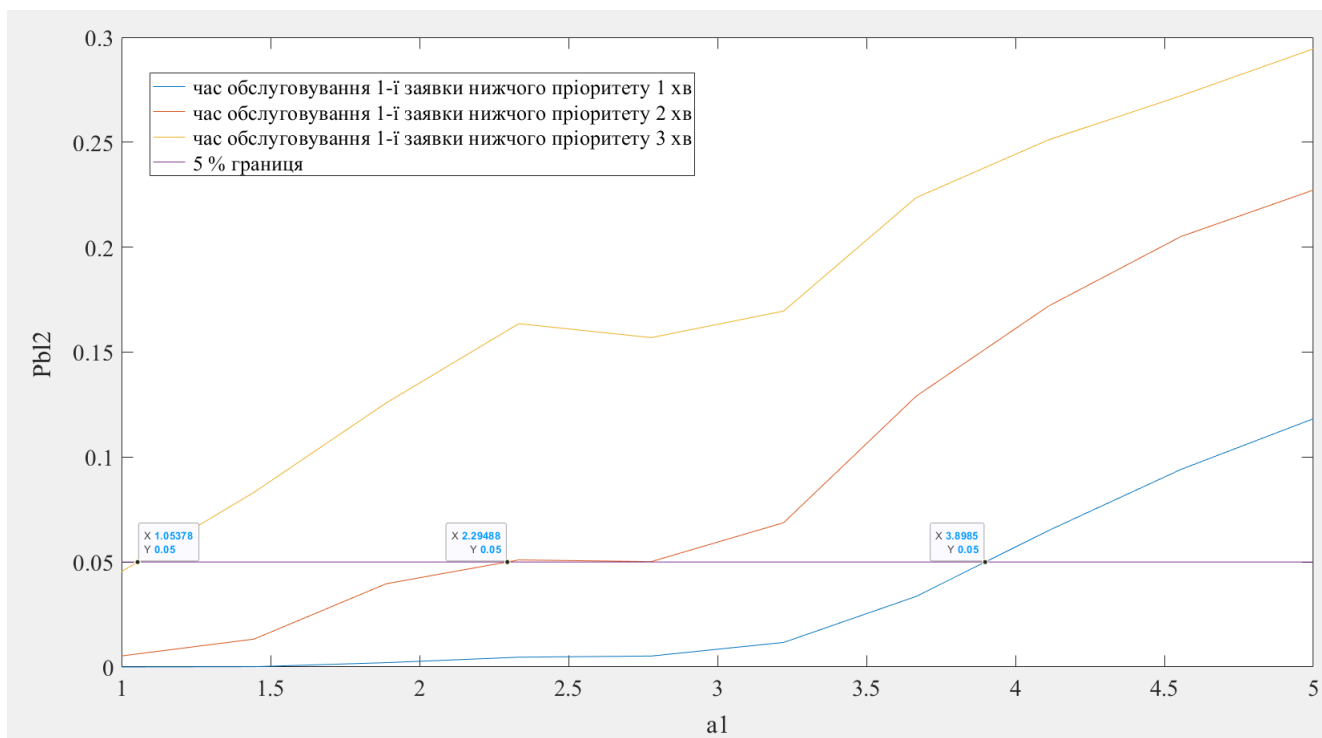


Рисунок 4.9 – Графік залежності імовірності блокування заявки з нижчим пріоритетом від інтенсивності потоку заявок з вищим пріоритетом

З отриманих даних, які ми бачимо на графіку, можливо зробити наступний висновок, що інтенсивність потоку заявок вищого пріоритету має прямо пропорційне відношення на імовірність блокування заявок нижчого пріоритету. Бо для обслуговування вищих за пріоритетом заявок ми виконуємо звільнення каналу через скидання заявок з нижчим пріоритетом. Оптимальний час для обслуговування заявок нижчого пріоритету в даному випадку 2 хвилини.

4.5 Висновки за розділом

Базова станція є важливим елементом системи залізничного радіозв'язку FRMCS (Future Railway Mobile Communication System). Базову станцію можна

представити як систему масового обслуговування, яка має обмежену кількість каналів обслуговування (каналів зв'язку) та обробляє виклик (заявки) абонентів з різним пріоритетом (автоматизованих систем керування рухом поїздів, працівників залізниці та пасажирів). У разі відсутності вільного каналу для абонента з вищим пріоритетом відбувається автоматичне звільнення каналу, що обслуговує користувача з нижчим пріоритетом.

В четвертому розділі були розроблені дві імітаційні моделі базової станції мережі FRMCS (без пріоритетності, та з двома пріоритетами – вищим та нижчим). Результати моделювання дуже добре співпадають з результатами розрахунків за формулою Ерланга, що підтверджує адекватність розроблених моделей. За допомогою імітаційних моделей були побудовані графіки, які демонструють залежності між імовірністю блокування і щільністю викликів. Проведена оцінка, яка необхідна щільність викликів, щоб імовірність блокування не перевищувала 5% границю. Було проведено дослідження пріоритетної системи масового обслуговування та визначено вплив щільності потоку заявок з вищим пріоритетом на ймовірність блокування заявок з нижчим пріоритетом.

Висока надійність досягається завдяки оптимізації розподілу ресурсів, що включає динамічне управління каналами обслуговування, адаптацію до інтенсивності трафіку та використання стратегії пріоритетів для критично важливих запитів. Таким чином, після проведених досліджень ми дізналися, що FRMCS сприяє не лише підвищенню ефективності транспортних процесів, а й покращенню рівня безпеки, що є критично важливим у сучасних умовах цифровізації залізниць.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Сучасний розвиток залізничного транспорту невіддільно пов'язаний із впровадженням інноваційних систем зв'язку та регулювання руху, які забезпечують ефективність, безпеку і високу пропускну здатність. Основою для цього слугує цифровий радіозв'язок, зокрема технології GSM-R і FRMCS, які дозволяють створювати гнучкі та адаптивні системи управління. Мережі FRMCS виступають важливим елементом зв'язку, обробляючи великий обсяг заявок, від екстрених викликів до запитів пасажирів, оптимізуючи розподіл ресурсів і підтримуючи безперебійний зв'язок. Водночас система інтервального регулювання руху поїздів зазнає суттєвих змін. Традиційні підходи з фіксованими блок-ділянками, попри їх базову надійність, не відповідають сучасним вимогам через обмеження пропускну здатності. Гібридні системи, що поєднують фізичні та віртуальні блоки, надають нові можливості, дозволяючи адаптувати інтервали руху до реальних умов і поступово переходити до повністю цифрових рішень. Особливу перспективу має система віртуальних блок-ділянок, яка складається з чотирьох основних вузлів: системи диспетчерської централізації, наземної інфраструктури, системи локомотивної безпеки та системи супутникової навігації. В ході досліджень був детально проаналізований блок локомотивної безпеки і його алгоритм роботи. Далі проведені порівняння, яка система інтервального регулювання руху найкраще підходить для розрахунку міжпоїзного інтервалу на перегонах. Результатом даних обчислень стало те, що система віртуальних блок-ділянок найкраще оптимізує міжпоїзний інтервал, зберігаючи швидкість і безпеку. Згодом обґрунтовано, чому саме використання системи на базі FRMCS має найкращі перспективи. Створені імітаційні моделі базових станцій мобільного зв'язку для різних випадків пріоритетності і досліджені їх особливості. Таким чином впровадження системи віртуальних блок-ділянок на базі FRMCS підвищує ефективність роботи залізниці, забезпечує комфортний рух пасажирів і збільшує продуктивність залізничної інфраструктури, відповідаючи потребам цифрової епохи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Єлізаренко, А.О. Перспективні напрямки розвитку залізничного технологічного радіозв'язку [Текст] / А. О. Єлізаренко. – Харків: УкрДУЗТ, 2019. – 42 с.
2. Єлізаренко, А.О. Мережі технологічного радіозв'язку на залізничному транспорті [Текст]: Конспект лекцій / Єлізаренко, А.О., Єлізаренко О.В. – Харків: УкрДАЗТ, 2006. – 47с.
3. Description of Railway Radiocommunication Systems between Train and Trackside (RSTT) [Текст]: REPORT ITU-R M.2418-0 / Geneva: 11/2017.
4. Плотніков, М.Д. Системи зв'язку з рухомими об'єктами для студентів усіх форм навчання напряму 6.050903 [Текст]: Конспект лекцій з дисципліни / Телекомунікації/Упоряд.: М.Д. Плотніков, М.В. Москалець. – Харків: ХНУРЕ, 2010. – 204 с.
5. GSM-R and how it differs from GSM [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://media.ccc.de/v/osmodevcall-20210813-laforge-gsm-r#t=2053>.
6. UIC WG FM. REPORT ON INTERFERENCES TO GSM-R [Текст]: Document No. O-8700 / UIC WG FM, 30 May 2012. – 43 p.
7. What is FRMCS, the Future Railway Mobile Communication System? [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://uic.org/rail-system/telecoms-signalling/frmcs>.
8. RailEngineer. FRMCS – Radio network planning fundamentals. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://www.railengineer.co.uk/frmcs-radio-network-planning-fundamentals>
9. FRMCS. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/swfnua>.
10. Colin Snook. Domain-Specific Scenarios for Refinement-based Methods. [Електрон. ресурс]: article / Colin Snook, Thai Son Hoang, Dana Dghaym, Asieh Salehi Fathabadi, Michael Butler; Journal of Systems Architecture – July 2020. – Режим доступу: <https://surl.li/zytrqs>.
11. Daniel Knutsen. Capacity evaluation of ERTMS/ETCS hybrid level 3 using simulation methods [Електрон. ресурс] / Daniel Knutsen, Nils O.E. Olsson, Jiali Fu;

Journal of Rail Transport Planning & Management – Volume 30, June 2024. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2024.100444>.

12. European Railway Traffic Management System (ERTMS) Presentation. [Електрон. ресурс] – 6 June 2024 – Режим доступу: <https://surl.li/iaojhh>.

13. RSSB. ERTMS Handbook: Handbook RS525 [Текст] / RSSB – First issued December 2022; Issue 1, September 2022.

14. Бурковский, Ю. В. Сравнительный анализ традиционных и координатных систем интервального регулирования движения поездов [Текст] / Ю. В. Бурковский, К. В. Гончаров // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2014. – Ном. X. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2014. – С.

15. Egidio Quaglietta. Modelling and analysis of Virtual Coupling with dynamic safety margin considering risk factors in railway operations. [Електрон. ресурс] / Egidio Quaglietta, Panagiotis Spartalis, Meng Wang, Rob M.P. Goverde, Paul van Koningsbruggen; Journal of Rail Transport Planning & Management – June 2022 – Режим доступу: <https://surl.li/txdyuw>.

16. Теорія масового обслуговування [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://surl.li/egszqn>.

17. Від GSM-R до FRMCS. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://www.malux.se/funkwerk-frmcs>.

18. Michael Steer. 4G, Fourth Generation Radio. [Електрон. ресурс]: article / Michael Steer – North Carolina State University. – Режим доступу: <https://eng.libretexts.org/@go/page/41221>.

19. Лагута, В.В. Математичне моделювання на ЕОМ [Текст]: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт / Укл.:В. В. Лагута, К. В. Гончаров. – Дніпропетр. нац. ун-т. залізн. трансп.; – Д., 2004. – 44 с.

Програма моделювання базової станції мобільного зв'язку без пріоритетності
ВИКЛИКІВ

```

function Pb1 = model_base_station_no_priorities(m,tz,a)
% Параметри моделі
N = 100; % Кількість експериментів
m = 20; % Кількість каналів
Tkin = 1000; % Час закінчення моделювання
tz = 2; % Час обслуговування однієї заявки (хвилини)
a = 5; % Середня кількість абонентів за хвилину

% Розрахунок середнього інтервалу між надходженням заявок (в хвилинах)
avg_tau = 1 / a;

% Ініціалізація змінних
Zvik = zeros(N, 1);
Zvidm = zeros(N, 1);

for j = 1:N
    t = zeros(m, 1);
    Tk = 0;
    k = 1;

    while Tk < Tkin
        % Пошук вільного каналу
        i = 1;
        while t(i) > Tk && i < m
            i = i + 1;
        end

        % Обслуговування заявки або відмова
        if t(i) <= Tk && i <= m
            t(i) = Tk + tz;
            Zvik(j) = Zvik(j) + 1;
        else
            Zvidm(j) = Zvidm(j) + 1;
        end
    end

    % Генерація часу надходження наступної заявки
    tau = exprnd(avg_tau); % Параметр експоненціального розподілу
    Tk = Tk + tau;
    k = k + 1;

end

end

% Обчислення середніх значень
Svik = mean(Zvik);
Svidm = mean(Zvidm);

Pb1 = Svidm/(Svik+Svidm);
End

```

Програма моделювання базової станції мобільного зв'язку з пріоритетністю ВИКЛИКІВ

```

function Pbl = model_base_station2(m,tz1,tz2,a1,a2)
% Параметри моделі
N = 50; % Кількість експериментів
Tkin = 200; % Час закінчення моделювання

% Розрахунок середнього інтервалу між надходженням заявок (в хвиликах)
avg_tau1 = 1 / a1;
avg_tau2 = 1 / a2;

% Ініціалізація змінних
Zvik1 = zeros(N, 1);
Zvidm1 = zeros(N, 1);
Zvik2 = zeros(N, 1);
Zvidm2 = zeros(N, 1);
Pbl = [0, 0];

for j = 1:N
    t = zeros(m, 1);
    p = zeros(m,1); % p(i) - пріоритет заявки, яку обслуговує i-ий канал
    % p(i) = 1 або 2 або 3, якщо канал вільний p(i) = 0
    Tk1 = 0; % час надходження заявок з першим пріоритетом
    Tk2 = 0; % час надходження заявок з другим пріоритетом
    while Tk1 < Tkin || Tk2 < Tkin

        if Tk2 < Tkin
            % Пошук вільного каналу для заявок з другим пріоритетом
            Nch = search_chanel(m,Tk2,t);
            % Обслуговування заявки з другим пріоритетом або відмова
            if Nch > 0
                t(Nch) = Tk2 + tz2;
                p(Nch)= 2;
                Zvik2(j) = Zvik2(j) + 1;
            else
                Zvidm2(j) = Zvidm2(j) + 1;
            end
            % Генерація часу надходження наступних заявок
            tau2 = exprnd(avg_tau2); % Параметр експоненціального розподілу
            Tk2 = Tk2 + tau2;
        end

        if Tk1 < Tkin
            % Пошук вільного каналу для заявок з першим пріоритетом
            Nch = search_chanel(m,Tk1,t);
            % Обслуговування заявки з першим пріоритетом або відмова
            if Nch > 0
                t(Nch) = Tk1 + tz1;
                p(Nch)= 1;
                Zvik1(j) = Zvik1(j) + 1;
            else
                ch = 1;
                while p(ch) == 1 && ch < m
                    ch = ch + 1;
                end
                if p(ch) == 2 && ch <= m

```

```
t(ch) = Tk1 + tz1;
p(ch)= 1;
Zvik1(j) = Zvik1(j) + 1;
Zvidm2(j) = Zvidm2(j) + 1;
else
    Zvidm1(j) = Zvidm1(j) + 1;
end
end
end

% Генерація часу надходження наступних заявок
tau1 = exprnd(avg_tau1); % Параметр експоненціального розподілу
Tk1 = Tk1 + tau1;
end
end

end

% Обчислення середніх значень
Svik1 = mean(Zvik1);
Svidm1 = mean(Zvidm1);
Pbl(1) = Svidm1 / (Svik1 + Svidm1);

Svik2 = mean(Zvik2);
Svidm2 = mean(Zvidm2);
Pbl(2) = Svidm2 / (Svik2 + Svidm2);

end
```