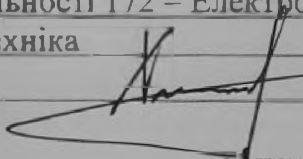


Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

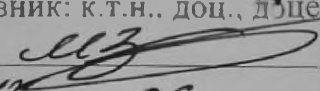
Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО ПЛАНУВАННЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ
МОБІЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Виконав: студент 2-го курсу, групи ПЗТ-23мсз
спеціальності 172 – Електронні комунікації та
радіотехніка

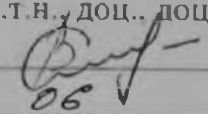
 Хринівський Д. О.

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ІКСТ

 Васильківський М.В.

« 12 » 06 2025 р.

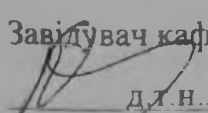
Рецензент: д.т.н., доц., доцент каф. ІРТС

 Воловик А.Ю.

« 12 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 12 » 06 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 172 – Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

«05» 05 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ
Хринівському Дмитру Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Метод автоматизованого планування базових станцій мобільних телекомунікаційних систем

керівник роботи Васильківський Микола Володимирович, канд. техн. наук, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНТУ від “20” березня 2025 року № 97

2. Строк подання здобувачем роботи: 09 червня 2025 року

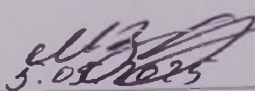
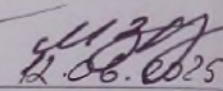
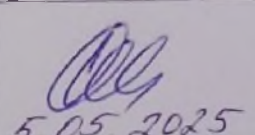
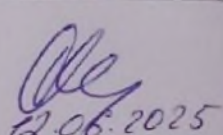
3. Вихідні дані до роботи: частотний діапазон (COST231-Hata) 1500 – 2000 МГц; діапазон відстаней (COST231-Hata) 1 – 20 км; висота антени базової станції 30 – 60 м; висота антени мобільної станції 1 – 2 м; тип середовища поширення – міська забудова; відстань повторення частоти (GSM-900) ≥ 6 км; міжсекторний захист ≥ 9 дБ; захист міжкоміркового сусідства ≥ 12 дБ; потужність передавача БС (на 420МГц) - 44 дБм; чутливість приймача (динамічні умови на 420МГц) - 106 дБм.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, огляд і аналіз предметної області, метод автоматизованого розміщення базових станцій транкінгових систем зв'язку, проектування системи GSM в ATOLL, проектування систем UMTS та LTE в програмі ATOLL, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): однотональна транкінгова система зв'язку; багатотональна транкінгова система зв'язку; зона покриття за модифікованою моделлю COST231-Hata; моделі поширення

радіохвиль, реалізовані в Atoll; схеми під'єднання базових станцій до контролерів BSC; режим точкового аналізу; результат моделювання розподілу швидкості передавання даних у напрямку вниз.

6. Консультанти розділів роботи

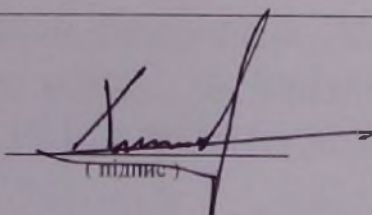
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Васильківський М.В., доцент кафедри ІКСТ	 5.05.2025	 12.06.2025
Охорона праці	Дембіцька С.В., професор кафедри БЖДПБ	 5.05.2025	 12.06.2025

7. Дата видачі завдання «05» травня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

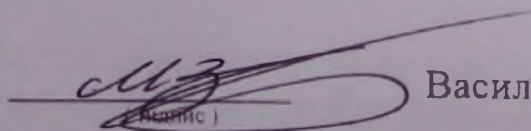
№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	06.05.2025р.	
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	19.05.2025р.	
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	02.06.2025р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	06.06.2025р.	
5	Нормоконтроль БКР	09.06.2025р.	
6	Попередній захист БКР	10.06.2025р.	
7	Рецензування БКР	11.06.2025р.	
8	Захист БКР	13.06.2025р.	

Здобувач


(підпис)

Хринівський Д.О.

Керівник роботи


(підпис)

Васильківський М.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Хринівський Д.О. Метод автоматизованого планування базових станцій мобільних телекомунікаційних систем. Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – електронні комунікації та радіотехніка, освітня програма – програмне забезпечення телекомунікаційних систем. Вінниця: ВНТУ, 2025. 103 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 38 назв; рис.: 49; табл. 24.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено, розроблено та частково реалізовано метод автоматизованого планування базових станцій (БС) мобільних телекомунікаційних систем, зокрема транкінгових систем зв'язку (ТСЗ). Робота має як теоретичне, так і прикладне значення для вдосконалення процесів проєктування безпроводових мереж зв'язку.

У процесі дослідження проведено порівняльний аналіз сучасного програмного забезпечення, що застосовується для моделювання радіопокриття ТСЗ, із фокусом на середовище Atoll. Обґрунтовано доцільність використання модифікованої моделі COST231-Nata для опису зон покриття в умовах міської забудови. Запропоновано математичну модель та алгоритм розрахунку зон обслуговування БС з урахуванням потужності передавачів, висоти антен і особливостей рельєфу. Розроблено метод автоматизованого розміщення БС, який базується на ітеративному уточненні зон покриття та оптимізації кількості і розміщення передавачів. На основі цього методу створено функціональну структуру програмного модуля, що реалізує основні етапи проєктування – від оцінювання зони покриття до вибору місць встановлення БС.

Практична апробація методики виконана в середовищі Atoll шляхом моделювання систем GSM, UMTS та LTE. Виявлено ключові особливості проєктування мереж різних поколінь, зокрема частотного планування, призначення фізичних ідентифікаторів стільників та оцінки ефективної

пропускної здатності. Результати роботи можуть бути використані для подальшої автоматизації проектування мобільних телекомунікаційних мереж, а також як навчальний матеріал у курсах з безпроводового зв'язку та телекомунікаційних технологій.

Ключові слова: автоматизоване планування, базова станція, транкінгова система зв'язку, GSM, UMTS, LTE, Atoll, COST231-Hata, радіопокриття, оптимізація мережі, мобільний зв'язок.

ABSTRACT

UDC 621.396

Khrinivskiy D.O. Method for Automated Planning of Base Stations in Mobile Telecommunication Systems. Bachelor's Qualification Thesis in Specialty 172 – Electronic Communications and Radiotechnology, Educational Program – Software for Telecommunication Systems. Vinnytsia: VNTU, 2025. – 103 p.

In Ukrainian. Bibliography: 38 titles; Illustrations: 49; Tables: 24.

This bachelor's qualification thesis explores, develops, and partially implements a method for automated planning of base stations (BS) in mobile telecommunication systems, particularly in trunked communication systems (TCS). The work has both theoretical and practical significance for improving the design processes of wireless communication networks.

During the study, a comparative analysis of modern software used for radio coverage modeling in TCS was conducted, with a focus on the Atoll environment. The feasibility of using a modified COST231-Hata model to describe coverage zones in urban environments is substantiated. A mathematical model and an algorithm for calculating BS service areas are proposed, taking into account transmitter power, antenna height, and terrain features.

A method for automated BS placement is developed, based on iterative refinement of coverage zones and optimization of the number and positioning of transmitters. A functional structure of a software module implementing the main stages of network design – from coverage estimation to BS site selection – has been created based on this method.

The proposed methodology was practically tested in the Atoll environment through the modeling of GSM, UMTS, and LTE systems. Key features of network design for different generations were identified, including frequency planning, assignment of physical cell identifiers, and evaluation of effective throughput. The results of the work can be applied for further automation of mobile network design and

as educational material in wireless communication and telecommunication technology courses.

Keywords: automated planning, base station, trunked communication system, GSM, UMTS, LTE, Atoll, COST231-Hata, radio coverage, network optimization, mobile communication.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	10
1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	12
1.1 Постановка задачі дослідження	12
1.2 Огляд та класифікація сучасних бездротових систем зв'язку.....	13
1.3 Аналіз сучасних цифрових транкінгових мереж	16
1.4 Висновки до розділу 1	20
2 МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗМІЩЕННЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ ТРАНКІНГОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ.....	22
2.1 Вимоги до методу розміщення базових станцій транкінгових систем зв'язку.....	22
2.2 Алгоритм розрахунку зон покриття базових станцій із використанням модифікованої моделі COST231-Hata.....	23
2.3 Висновки до розділу 2	34
3 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ GSM В ATOLL	36
3.1 Аналіз та дослідження моделей поширення радіохвиль у програмному середовищі ATOLL	36
3.2 Моделювання радіопокриття системи GSM у середовищі Atoll на заданій території	41
3.3 Моделювання радіорелейної лінії у телекомунікаційній мережі.....	46
3.4 Принципи розподілу робочих частот базових станцій системи GSM у середовищі Atoll	53
3.5 Висновки до розділу 3	60
4 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ UMTS ТА LTE В ПРОГРАМІ ATOLL.....	62
4.1 Моделювання параметрів радіопокриття системи UMTS на визначеній території за допомогою програмного середовища Atoll	62
4.2 Моделювання радіопокриття системи LTE на заданій території у середовищі Atoll	70

	7
4.3 Висновки до розділу 4	78
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	80
5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	81
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	85
5.3 Пожежна безпека.....	89
ВИСНОВКИ.....	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	94
Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА	98
Додаток Б ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	103

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AP — абонентська радіостанція
BC — базова станція
ЗП — зона покриття
ІРІ — Інститут радіоелектроніки та інформатики
КУ — канал управління
МС — мобільна станція
МСЕ — Міжнародний союз електрозв'язку
ПК — персональний комп'ютер
ПЗ — програмне забезпечення
ПС — портативна станція
СУБД — система управління базами даних
ТЗ — технічне завдання
ТСЗ — транкінгові системи зв'язку
УВЧ — ультрависокі частоти
УКХ — ультракороткі хвилі
ЕМП — електромагнітне поле
AMPS — розширена система мобільного зв'язку
BPSK — двійкова фазова маніпуляція
CDMA — кодовий множинний доступ
D-AMPS — цифрова розширена система мобільного зв'язку
DMR — цифрове мобільне радіо
EDACS — удосконалена система цифрового доступу
FDMA — множинний доступ з частотним розділенням
FSK — частотна маніпуляція
GPS — глобальна система позиціонування
GSM — глобальна система мобільного зв'язку
HPSK — гібридна фазова маніпуляція
IMT — міжнародні мобільні телекомунікації

LTE — довгострокова еволюція

LTR — логічний транкінговий радіозв'язок

OFDMA — ортогональний частотний множинний доступ

QAM — квадратурна амплітудна модуляція

QPSK — квадратурна фазова модуляція

SCPC — один канал на одну несучу

TACS — система загального доступу

TDMA — множинний доступ із часовим розділенням

TETRA — наземний транкінговий радіозв'язок

UMTS — універсальна мобільна телекомунікаційна система

VSAT — термінал супутникового зв'язку з малою апертурою

WiMAX — глобальна взаємодія мікрохвильових мереж доступу

ВСТУП

Актуальність теми. Однією з характерних особливостей транкінгових систем зв'язку (ТСЗ) є автоматизований розподіл обмеженого спектру радіоканалів між абонентами. Вибір вільного каналу не виконується вручну — система самостійно відстежує запити на з'єднання та здійснює розподіл ресурсів у порядку черги. Після завершення сеансу зв'язку канал звільняється та стає доступним для використання іншими абонентами. Завдяки швидкому встановленню з'єднання та високому рівню захищеності, ТСЗ широко застосовуються у підрозділах оперативного реагування, службах безпеки, рятувальних службах, як у державному, так і в комерційному секторі [1].

Попри активний розвиток систем мобільного зв'язку п'ятого та шостого покоління (5G/6G), транкінгові системи залишаються актуальними та затребуваними в різноманітних галузях. Їх використовують як у міській та сільській місцевості, так і у віддалених регіонах, де потрібна надійна та оперативна передача інформації. У зв'язку з цим завдання модернізації та подальшого розвитку транкінгових систем зв'язку є актуальним напрямом науково-технічних досліджень [2].

Аналіз останніх досліджень. Питанням проектування транкінгових систем зв'язку та розробки методів розміщення базових станцій присвячено низку наукових праць, серед авторів яких — R. Mathar, M. Sladan, E. Amaldi та інші дослідники [3].

На сьогодні існує значна кількість програмних засобів для проектування систем зв'язку, серед яких варто виокремити RadioPlanner, RadioMobile, OnePlan та інші. Проте, незважаючи на наявність великого обсягу теоретичних досліджень, а також розмаїття підходів і алгоритмів оптимального розміщення базових станцій (БС), залишається невирішеною проблема автоматизованого планування інфраструктури транкінгових мереж з урахуванням реальних умов радіохвильового поширення. Забезпечення автоматизованого розміщення базових станцій з урахуванням особливостей радіооточення є актуальним

завданням, яке дозволяє суттєво знизити трудомісткість процесу проектування зон покриття транкінгових систем зв'язку та підвищити їх ефективність у практичному застосуванні [3].

Мета та постановка задачі. Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є зменшення кількості базових станцій, необхідних для забезпечення покриття території, яка входить до зони відповідальності проєктованої транкінгової системи зв'язку.

Задачами бакалаврської кваліфікаційної роботи є:

1. Аналіз і дослідження існуючих методів розрахунку зон покриття та методів розміщення базових станцій транкінгових систем;
2. Дослідження алгоритму розрахунку зони покриття базової станції, що базується на модифікованій моделі COST231-Hata;
3. Розробка математичної моделі автоматизованого розміщення базових станцій з урахуванням додаткових втрат на трасі поширення радіосигналу;
4. Розробка методу автоматизованого розміщення базових станцій ТСЗ на основі попереднього та уточненого розрахунку зон обслуговування з метою забезпечення зв'язком заданої території;
5. Використання програмного забезпечення, яке реалізує запропонований метод розміщення базових станцій та розрахунок зон покриття;
6. Розробка інженерної методики проєктування мобільних телекомунікаційних систем, що забезпечує зниження трудомісткості формування зон покриття базових станцій.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на науковій конференції ВНТУ у 2025 році.

1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Постановка задачі дослідження

Транкінгові системи зв'язку призначені для забезпечення користувачів гарантовано стійким і захищеним зв'язком, доступним за будь-яких умов. ТСЗ використовуються для передачі критично важливої інформації, що забезпечує:

- безперебійну роботу виробничих циклів на інфраструктурних та життєзабезпечувальних підприємствах;
- безперервність функціонування державних служб;
- безпеку та здоров'я населення [4].

На сьогодні проводяться роботи щодо трьох стандартів професійного рухомого радіозв'язку (ПРР). Основною метою нових стандартів є забезпечення технологічного суверенітету країни в галузі ПРР шляхом переходу на уніфіковане вітчизняне обладнання. Для проєктування ПРР існує значна кількість програмних засобів, що дозволяють користувачу розраховувати зони покриття та виконувати частотно-територіальне планування. При цьому більшість програм вимагає ручного визначення місць встановлення базових станцій, що призводить до збільшення часу проєктування та ускладнює процес.

Аналіз наукових праць різних авторів виявив низку недоліків, серед яких:

- відсутність урахування реальних умов поширення радіохвиль;
- розміщення базових станцій із зонами покриття однакового розміру;
- ігнорування кількості абонентів, що потребують забезпечення зв'язком.

Розробка методу автоматизованого розміщення базових станцій транкінгових систем зв'язку, який враховує зазначені недоліки, є актуальним завданням, що дозволяє знизити трудомісткість проєктування ТСЗ та забезпечити гарантоване покриття заданої території. Таким чином, метою даної роботи є зменшення кількості базових станцій, необхідних для покриття зони відповідальності проєктованої транкінгової системи зв'язку, шляхом розв'язання

наукової задачі розробки та дослідження методу автоматизованого розміщення базових станцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Аналіз і дослідження існуючих методів розрахунку зон покриття та методів розміщення базових станцій ТСЗ;
2. Розробка та дослідження алгоритму розрахунку зони покриття базової станції на основі модифікованої моделі COST231-Хата;
3. Розробка та дослідження математичної моделі автоматизованого розміщення базових станцій з урахуванням додаткових втрат на трасі поширення радіосигналу;
4. Розробка методу автоматизованого розміщення базових станцій ТСЗ, що базується на попередньому та уточненому розрахунку зон обслуговування для забезпечення покриття необхідної території зв'язком;
5. Розробка програмного забезпечення, що реалізує розміщення базових станцій та розрахунок зон покриття на основі запропонованого методу;
6. Розробка методики проектування ТСЗ, що дозволяє знизити трудомісткість проектування зон покриття базових станцій.

1.2 Огляд та класифікація сучасних бездротових систем зв'язку

Системи мобільного (рухомого) зв'язку характеризуються широким спектром функціональних можливостей [5].

Такі системи забезпечують постійний доступ до засобів комунікації та передачі інформації незалежно від місця розташування користувача в межах зони покриття оператора мобільного зв'язку. Вони відіграють ключову роль у розвитку мобільних застосунків, інтернету речей (IoT) та інших технологій, що залежать від надійного доступу до високошвидкісних мереж передачі даних.

Із розвитком технологій мобільного зв'язку з'являються нові функціональні можливості, зокрема підвищення швидкості передачі даних, зменшення затримок, збільшення пропускної здатності мереж та покращення якості

обслуговування кінцевих користувачів. Класифікацію систем мобільного зв'язку наведено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Класифікація мереж мобільного (рухомого) зв'язку

Перехід від аналогових стандартів до цифрових у системах рухомого зв'язку обумовлений необхідністю підвищення оперативності, надійності, безпеки передачі інформації, а також розширенням спектру послуг зв'язку. Одним із перших цифрових стандартів, що був реалізований на практиці, став стандарт EDACS, розроблений у Швеції. У цих системах застосовується частотний розподіл каналів із використанням високошвидкісного спеціалізованого контрольного каналу [24]. Система EDACS дозволяє обслуговувати значні за площею території завдяки реалізації багатозонального покриття (до 32 зон). Абонентам надається підтримка кількох типів викликів:

- групові виклики, які можуть бути організовані на рівні всієї організації, її відділу або підрозділу;
- індивідуальні виклики типу «кожен з кожним», що є захищеними від прослуховування;
- екстрені виклики з найвищим пріоритетом обробки;
- виклики до мережі загального користування (ТФОП), які дозволяють абонентам транкінгової мережі взаємодіяти з користувачами телефонної мережі.

У 1989 році в США було розпочато розробку цифрового стандарту APCO 25, основною метою якого було створення системи, орієнтованої на потреби служб громадської безпеки. Серед ключових принципів цього стандарту [25]:

- забезпечення поступового переходу до цифрового зв'язку з можливістю сумісної роботи з існуючими аналоговими абонентськими пристроями;
- відкритість архітектури з метою стимулювання конкуренції між виробниками обладнання;
- забезпечення міжвідомчої взаємодії між різними екстреними службами під час спільних операцій. Ці вимоги стали підґрунтям для створення стандарту APCO 25, який забезпечує захищене, надійне та ефективне голосове й дане передавання, що є критично важливим у надзвичайних ситуаціях. Стандарт також підтримує різні типи шифрування й автентифікації, що робить його особливо придатним для використання в системах громадської безпеки.

У середині 1990-х років у Європі було створено відкритий стандарт TETRA (Terrestrial Trunked Radio), який передбачає сумісність обладнання різних виробників. Початок розробки було покладено ще у 1989 році чотирма провідними компаніями: Ericsson, Motorola Solutions, Nokia та *Philips, які працювали над концепцією цифрових транкінгових систем MDTRS (Mobile Digital Trunked Radio System) [26].

Серед основних переваг системи TETRA [6]:

- спектральна ефективність у 2–4 рази вища за аналогові системи;
- ефективніше повторне використання частот;
- високий рівень захисту мовлення завдяки цифровому кодуванню та можливості шифрування;
- стабільна якість передачі голосу при змінному рівні сигналу;
- висока швидкість передавання даних;
- підтримка секторизації покриття.

Система TETRA призначена для надання зв'язку великій кількості абонентів у межах порівняно компактних територій, з можливістю голосового та даного обміну як в індивідуальному, так і груповому режимах. У 2005 році в

Європі було також стандартизовано систему DMR (Digital Mobile Radio), що є альтернативним цифровим транкінговим стандартом. Однією з головних переваг DMR є більша (у 2–3 рази) зона покриття порівняно з TETRA, що дозволяє зменшити кількість необхідних базових станцій. Цей стандарт орієнтований насамперед на забезпечення надійного зв'язку на великих територіях, а не на максимальну кількість одночасно підключених користувачів [7]. Обладнання DMR підтримує як цифровий, так і аналоговий режими роботи з автоматичним перемиканням залежно від типу прийнятого сигналу, що особливо актуально в перехідний період. DMR також підтримує різні рівні шифрування, передавання даних і голосу, що робить його універсальним рішенням як для державних структур, так і для комерційного використання. Водночас стандарт DMR має й певні обмеження — зокрема, меншу спектральну ефективність у порівнянні з TETRA, що може бути критичним у разі обмеженого доступу до частотного ресурсу. Усі наведені стандарти — EDACS, APCO 25, TETRA та DMR — належать до другого покоління мереж мобільного (рухомого) зв'язку (2G) і є основою сучасних транкінгових систем, орієнтованих на високонадійний та безпечний зв'язок [8].

1.3 Аналіз сучасних цифрових транкінгових мереж

Транкінговий радіозв'язок (ТРЗ) призначений для ефективного розподілу обмеженого радіочастотного ресурсу (каналів зв'язку) між групами користувачів [9]. Транкінгові системи зв'язку — це спеціалізовані радіотелекомунікаційні системи, що забезпечують надійну та оперативну передачу інформації, зокрема для структур із критичними вимогами до зв'язку, таких як поліція, пожежно-рятувальні підрозділи, служби швидкої медичної допомоги та інші аварійно-рятувальні формування. Окрім екстрених служб, транкінгові системи широко застосовуються в галузях, де необхідне забезпечення безперервного та координованого зв'язку, зокрема у транспортній сфері, енергетичному секторі,

промисловості та комунальному господарстві. Класифікацію транкінгових систем зв'язку наведено на рисунку 1.2.

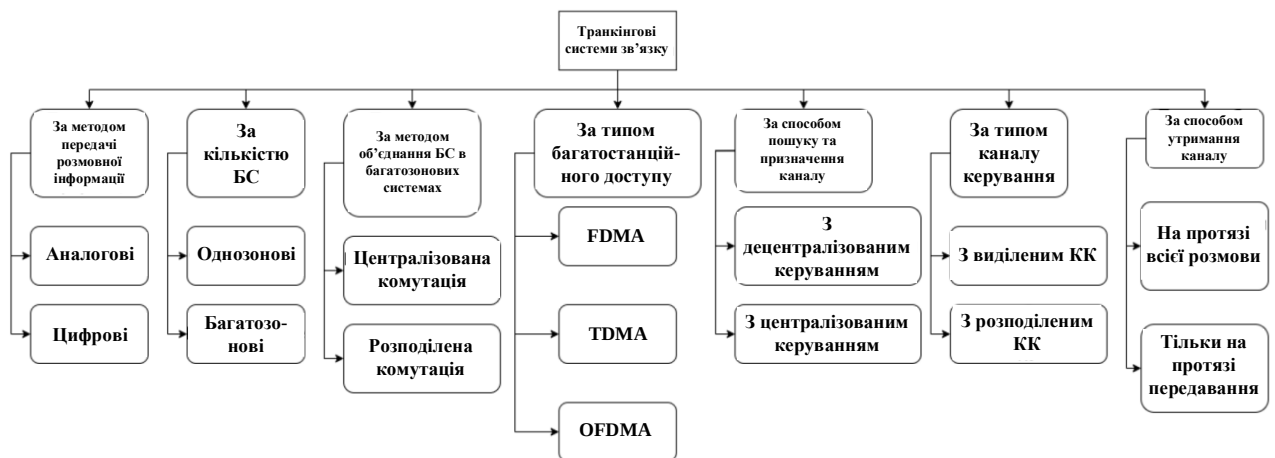


Рисунок 1.2 – Класифікація систем транкінгового радіозв'язку

Розглянемо детальніше класифікацію транкінгових систем зв'язку (ТСЗ) за кількістю базових станцій. Залежно від кількості базових станцій та особливостей архітектури системи, ТСЗ поділяються на одно-зонові та багатозонові. Однозонові системи передбачають наявність лише однієї базової станції, тоді як у багатозонових застосовується кілька базових станцій, організованих для забезпечення широкої зони покриття [10]. У структурі однозонових ТСЗ базову станцію зазвичай розміщують у центрі зони обслуговування. Антена такої станції, як правило, має всеспрямовану (кругову) діаграму направленості. Антенні системи базових станцій можуть бути як ненаправленими — забезпечують рівномірне випромінювання сигналу в усіх напрямках, так і направленими (секторними), коли енергія сигналу зосереджується в певному секторі простору для покращення ефективності покриття та зменшення впливу перешкод.

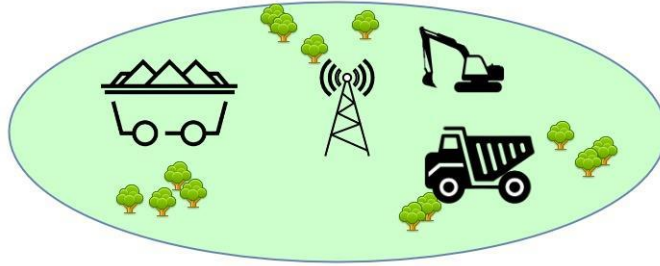


Рисунок 1.3 – Однозонова транкінгова система зв'язку

Однозонова транкінгова система зв'язку — це тип системи, в якій функціонування всієї мережі забезпечується єдиною базовою станцією. Такий підхід застосовується в умовах обмеженого радіопокриття або при локалізованому обслуговуванні абонентів, наприклад, на окремих промислових об'єктах, підприємствах або в межах невеликого населеного пункту. Центральне розміщення базової станції дозволяє забезпечити повне покриття обраної території, зазвичай з використанням всеспрямованої антени. Перевагами такої архітектури є простота розгортання, менші витрати на інфраструктуру та зручність обслуговування.

На початкових етапах розвитку транкінгових систем зв'язку (ТСЗ) стандарти не передбачали механізмів взаємодії між різними зонами обслуговування [11]. Сьогодні, з метою розширення території покриття системи або забезпечення зв'язку для великої кількості абонентів, застосовуються багатозонові транкінгові системи зв'язку. У таких системах уся зона обслуговування поділяється на окремі соти (осередки), кожна з яких обладнана власною базовою станцією. Це забезпечує можливість комунікації між абонентами, що перебувають у різних осередках (див. рис. 1.4). Розмір кожної соти визначається щільністю розміщення користувачів у конкретному регіоні, потужністю передавачів та встановлюється проєктантом системи під час етапу планування шляхом вибору оптимального розміру кластера. Під час переміщення абонента з однієї соти до іншої система автоматично виконує

передачу сеансу зв'язку (гандовер) на ту базову станцію, яка обслуговує зону, де в поточний момент знаходиться користувач [12].

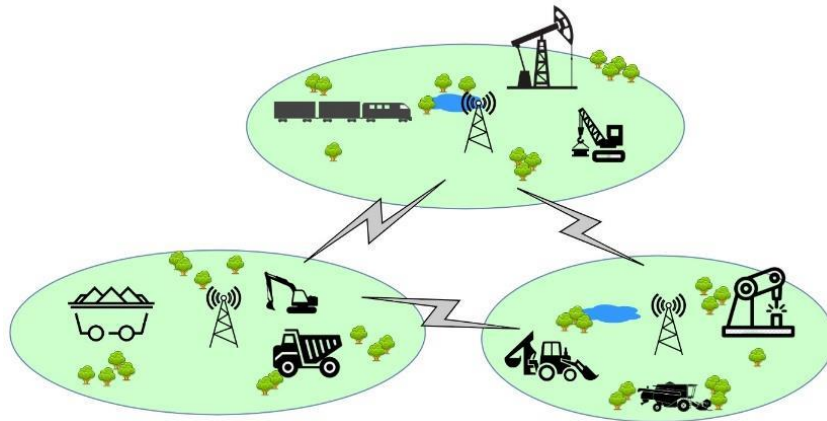


Рисунок 1.4 – Багатозонова транкінгова система зв'язку

Багатозонова транкінгова система зв'язку — це тип архітектури ТСЗ, що передбачає використання кількох базових станцій, кожна з яких обслуговує окрему частину території, поділену на соти (осередки). Такий підхід дозволяє масштабувати систему, забезпечуючи зв'язок на розширених територіях і для великої кількості абонентів. Кожна сота має власну базову станцію, яка координує радіодоступ у межах своєї зони покриття, а зв'язок між сотами забезпечується централізованою мережею керування. Перемикання обслуговування абонента при його переміщенні з однієї зони до іншої виконується автоматично без розриву зв'язку, що є критично важливим для оперативних служб та мобільних користувачів. Такий тип системи доцільний у випадках, коли необхідно забезпечити стабільну та безперебійну радіозв'язок у великих міських агломераціях, на промислових об'єктах, транспортних коридорах або у віддалених регіонах з підвищеними вимогами до надійності комунікацій.

Поділ території, що підлягає покриттю зв'язком, на соти здійснюється на основі статистичних та детермінованих методів моделювання поширення радіосигналів у системах зв'язку. У статистичних методах обслуговувана зона розбивається на соти однакового розміру, який визначається за допомогою

відомих моделей, таких як модель Окумура, модель Окумура-Хата, модель Лонглі-Райса та інші. Ці моделі базуються на емпіричних даних та усереднених характеристиках середовища поширення сигналу. При застосуванні детермінованих методів виконується більш точний розрахунок і вимірювання параметрів системи з урахуванням впливу перешкод на трасі поширення радіосигналу, а також визначаються оптимальні місця розташування базових станцій з урахуванням рельєфу місцевості. Методи статистичного прогнозування базуються на даних вимірювань реальних радіосигналів. На їх основі формуються набори емпіричних кривих, що відображають зміну рівня електромагнітного поля залежно від відстані між передавачем і приймачем [13]. Зона покриття базової станції моделюється як коло, межа якого відповідає якісному рівню зв'язку. Зоною покриття вважається область, в якій рівень сигналу не нижчий за заданий поріг, проте це не гарантує стовідсоткову наявність радіозв'язку в усій межі зони.

1.4 Висновки до розділу 1

У роботі наведено огляд і аналіз сучасних систем зв'язку. Розглянуто етапи розвитку та основні характеристики кожного класу мереж рухомого зв'язку: мережі стільникового рухомого зв'язку, транкінгові мережі, мережі персонального радіодзвінка та супутникові системи зв'язку. Описано статистичні методи моделювання зон покриття, серед яких моделі Лонглі-Райса, Окумура-Хата, COST231-Хата, Волфіша-Ікегамі, а також детерміновані методи розрахунку зон покриття транкінгових мереж.

Представлено приклади реалізації автономних джерел живлення базових станцій, встановлених за межами міста у районах без централізованого електропостачання.

Окрім того, наведено огляд програмних засобів, призначених для проєктування зон покриття та частотно-територіального планування УКХ-систем зв'язку. Проведено аналіз наукових публікацій, присвячених розробці

алгоритмів автоматичного розміщення базових станцій у системах рухомого зв'язку. На основі виконаного аналізу предметної області сформульовано основні завдання дослідження.

2 МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗМІЩЕННЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ ТРАНКІНГОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

2.1 Вимоги до методу розміщення базових станцій транкінгових систем зв'язку

Існуючі методи розміщення базових станцій базуються на різних алгоритмах. Використання традиційних схем гілок і меж передбачає, що доступні місця для встановлення базових станцій уже визначено, а завдання розміщення полягає у виборі позицій серед усіх можливих варіантів таким чином, щоб забезпечити мінімально необхідну кількість базових станцій.

Застосування евристичного алгоритму дозволяє розмістити базові станції у всіх доступних місцях, після чого їх кількість поступово зменшується шляхом ітеративного вилучення надлишкових станцій. Базова станція вважається надлишковою, якщо всі користувачі, які можуть бути нею охоплені, також можуть обслуговуватись іншими базовими станціями.

Пошук оптимальних місць встановлення базових станцій, що базується на табу-пошуку, здійснюється ітеративно, переходячи від одного потенційного рішення до кращого, доки не буде досягнуто певного критерію зупинки.

Використання «жадібного» алгоритму забезпечує отримання найкращого рішення на кожному етапі з надією, що фінальне рішення буде близьким до оптимального [7].

Алгоритм мурашиної колонії є методом оптимізації, заснованим на ітеративному процесі пошуку оптимального рішення із постійним оновленням інформації про локальну якість рішень на кожному кроці алгоритму [2]. Перевагою мурашиного алгоритму є зменшення часу, необхідного для пошуку рішення.

Проблема планування транкінгової системи зв'язку (ТСЗ) стандарту DMR, що використовує метод часової модуляції TDMA, зазвичай поділяється на задачу планування покриття та задачу частотно-просторового планування [3–5].

На етапі планування покриття базові станції розміщуються таким чином, щоб рівень сигналу в будь-якій точці зони обслуговування був достатнім для надання послуг зв'язку [6–8].

На етапі частотного планування кожній базовій станції призначається набір каналів з урахуванням вимог до трафіку та якості обслуговування, що визначається співвідношенням сигнал/завади [7, 8]. Отже, можна зробити висновок, що вибір місць розташування базових станцій не може базуватися виключно на вимогах покриття, а також повинен враховувати пропускну здатність мережі.

На основі викладеного можна сформулювати основні вимоги до методу розміщення базових станцій транкінгових систем зв'язку:

- Метод має забезпечувати автоматизоване розміщення базових станцій, які покривають задану територію зв'язком;
- Під час визначення місць встановлення базових станцій втрати на трасі розповсюдження сигналу у висхідному каналі (від ПС до БС) не повинні перевищувати допустимий рівень на певній відстані;
- Метод має враховувати реальні умови поширення радіохвиль у зоні розміщення базових станцій;
- Кількість базових станцій, що забезпечують покриття заданої території, повинна бути мінімальною;
- Базові станції мають забезпечувати обслуговування визначеної кількості абонентів.

2.2 Алгоритм розрахунку зон покриття базових станцій із використанням модифікованої моделі COST231-Hata

Модель COST231-Hata є однією з найпоширеніших емпіричних моделей для прогнозування втрат на трасі радіосигналу в міських умовах, особливо в діапазоні частот 1500–2000 МГц. Її модифікація дозволяє підвищити точність розрахунків зон покриття базових станцій з урахуванням реальних умов

середовища. Запропонований алгоритм дозволяє оцінити дальність зв'язку в напрямку «переносна станція – базова станція» (ПС–БС), енергетичний потенціал радіолінії якого є меншим, ніж у зворотному напрямку «базова станція – переносна станція» (БС–ПС).

Класична модель Окумури–Хата враховує висоту, на якій розміщена антена базової станції (від 30 до 200 метрів), висоту антени передавального пристрою (від 1,5 до 10 метрів), відстань між ними, а також частоту передавання сигналу (1,6 ГГц). Ця модель враховує впливи дифракції, відбиття та розсіювання, зумовлені міськими структурами [1].

Розширена версія моделі Окумури–Хата — модель COST231-Hata — додатково враховує поправковий коефіцієнт C , що приймає значення 0 або 3 дБ, а також ефективну висоту підвішування антени базової станції, яка визначається за формулою [2]:

$$h_{\text{бс}} = h_{\text{бс}} + h_{\text{пд}} - h_{\text{пр}}; \quad (2.1)$$

де $h_{\text{бс}}$ — висота центра антени базової станції над рівнем землі;

$h_{\text{пд}}$ — висота над рівнем моря в точці розміщення базової станції;

$h_{\text{пр}}$ — висота над рівнем моря в точці розташування переносної станції.

Розглянемо алгоритм розрахунку зони покриття базової станції з використанням моделі COST231-Hata. Насамперед необхідно виконати розрахунок допустимого рівня втрат на трасі поширення сигналу, який включає три основні етапи:

1) Розрахунок потужності сигналу передавача, що випромінюється в ефір:

$$P_{\text{випр}} = P_S + G_A + B_C \text{ [дБ]}; \quad (2.2)$$

де P_S — потужність передавача;

G_A — коефіцієнт підсилення антени;

B_c — коефіцієнт передачі фідера та інших елементів тракту між передавачем і антеною (втрата сигналу у фідері).

Коефіцієнт передачі фідера обчислюється за формулою:

$$B_c = 1/b_\phi l_\phi; \quad (2.3)$$

де b_ϕ — питомі втрати в фідері (дБ/м);

l_ϕ — довжина фідера (м).

2) Розрахунок середньої потужності сигналу на приймальній антені, за якої забезпечується задана чутливість приймача:

$$P_A = P_{\text{пр}} - G_{\text{ПА}} - B_{\text{ПС}} + \Delta_c [\text{дБ}]; \quad (2.4)$$

де $P_{\text{пр}}$ — чутливість приймача;

$G_{\text{ПА}}$ — коефіцієнт підсилення приймальної антени;

B_c — втрати у фідері та інших елементах тракту між антеною і приймачем;

Δ_c — коефіцієнт забезпеченості зв'язку за місцем і часом, що приймає значення 0 дБ або 10 дБ залежно від вимог до якості зв'язку.

3) Розрахунок допустимого рівня втрат на трасі поширення радіосигналу:

$$L_d = P_{\text{випр}} - P_A = P_S + G_A + B_c - P_{\text{пр}} + G_{\text{ПА}} + B_{\text{ПС}} - \Delta_c [\text{дБ}]; \quad (2.5)$$

Знаючи допустимий рівень втрат на трасі поширення сигналу, необхідно за модифікованою моделлю COST231-Hata визначити максимальну відстань між переносною станцією (ПС) і базовою станцією (БС), при якій не перевищується допустимий рівень втрат. Розглянемо це на прикладі зони покриття у формі кола.

Визначається місце встановлення БС, після чого будується коло радіусом 250 м — стандартний крок, що приймається рівним довжині стільника (основної зони обслуговування). На колі обирається n кількість точок, у яких

передбачається розміщення переносних станцій; мінімальна кількість таких точок становить 4.

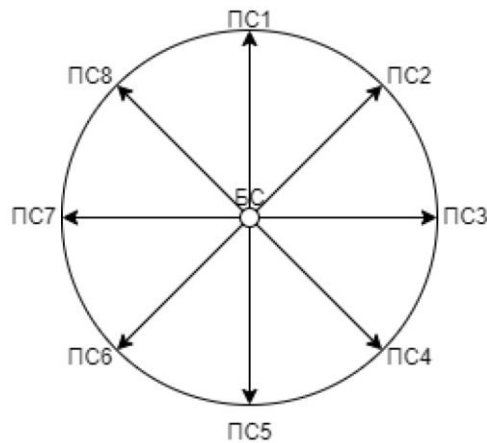


Рисунок 2.1 – Вибір передбачуваних місць розташування переносних станцій (ПС)

За топографічною картою місцевості визначаються висоти над рівнем моря в обраних точках розташування переносних станцій, а також у точці встановлення базової станції. Отримані значення підставляються у формулу [22], і рівень втрат на трасі поширення сигналу не повинен перевищувати розрахованого допустимого рівня втрат на трасі поширення сигналу [23]:

$$L_d \geq L[\text{дБ}]; \quad (2.6)$$

Якщо дана умова виконується, вважається, що при такому радіусі зони покриття забезпечується якісний рівень зв'язку, і радіус кола збільшується на 250 м. Далі обчислення повторюються доти, доки при одному або декількох напрямках ПС–БС розрахований рівень втрат не перевищить допустимого рівня втрат на трасі поширення сигналу. Такі напрямки назвемо «невдалими»; на рис. 2.2 вони позначені червоним кольором.

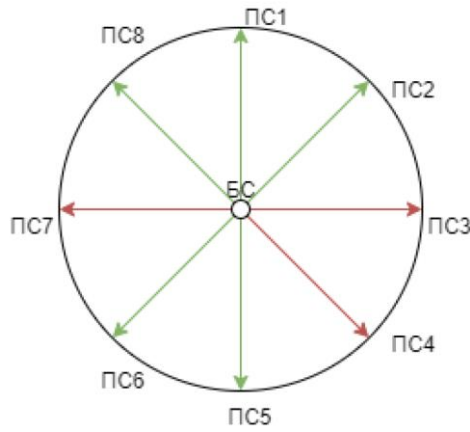


Рисунок 2.2 – Ідентифікація напрямків із перевищенням допустимого рівня втрат сигналу

У цьому випадку визначаються всі напрямки, що не відповідають умові (2.6), після чого радіус кола збільшується на 250 м. Проводяться обчислення рівня втрат на трасах поширення сигналу для зони покриття зі збільшеним радіусом. Якщо за «невдалими» напрямками рівень втрат не перевищує допустимого рівня втрат на трасі поширення сигналу, вважається, що точки, які розташовані на попередньому колі, є тіньовими зонами покриття.

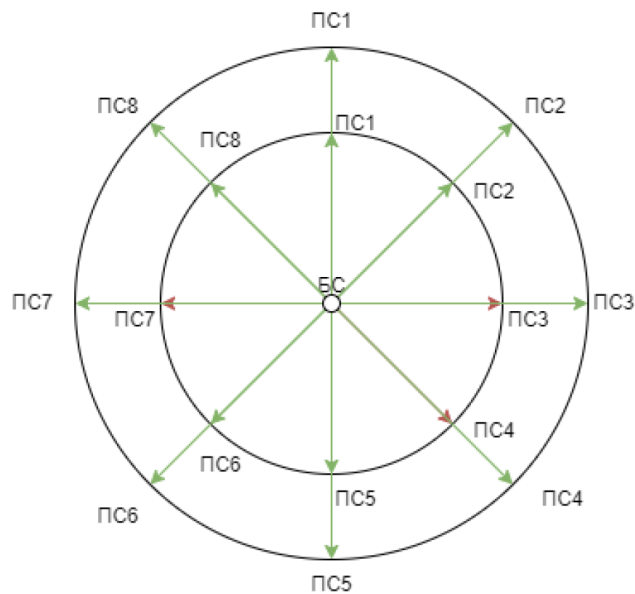


Рисунок 2.3 – Збільшення радіуса зони покриття

Середня швидкість руху людини становить приблизно 5 км/год, що еквівалентно близько 83 м/хв. Відповідно, за 3 хвилини людина долає орієнтовно 249 метрів. Таким чином, при русі з такою швидкістю абонент потенційно здатен залишити зону тіньового покриття протягом трьох хвилин. У зв'язку з цим вважається, що тіньові зони, які абонент може подолати менш ніж за 3 хвилини, не враховуються під час аналізу покриття. У випадку, якщо в одному з напрямків, які не задовольняють вимогам до якості сигналу, рівень втрат, розрахований після збільшення радіусу покриття, все ще перевищує допустиме значення, необхідно повернутися на два кроки назад у розрахунках. У такому разі отримане значення приймається як гранична відстань зони покриття у відповідному напрямку.

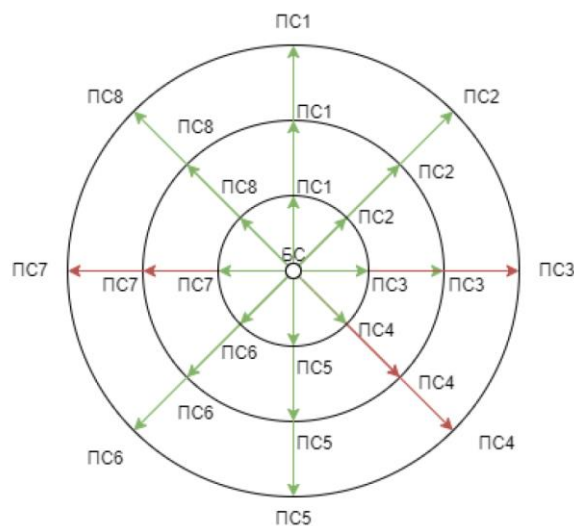


Рисунок 2.4 – Зона покриття, в межах якої забезпечується якісний рівень зв'язку в усіх напрямках

У напрямках, для яких виконується умова 2.6, продовжується поступове збільшення відстані на 250 м. У зв'язку з цим зона покриття може набувати як форми кола (у разі охоплення всієї заданої території), так і складнішої геометричної форми. Приклад такої зони покриття наведено на рисунку 2.5.

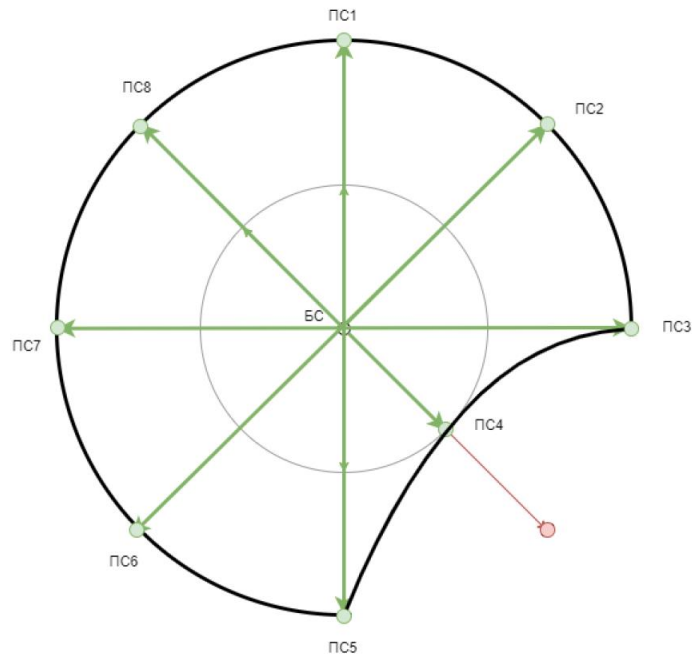


Рисунок 2.5 – Зона покриття базової станції (БС)

Для підвищення достовірності отриманих результатів доцільно зменшити крок зміни радіусу зони покриття та збільшити кількість потенційних місць розташування персонального пристрою (ПС), що, у свою чергу, призведе до зростання часу розрахунків. Запропоновано модифікувати модель COST231-Hata з урахуванням не лише висоти над рівнем моря у точці розташування ПС, але й висот у сусідніх точках. Обслуговувана територія розбивається на дискретні точки за допомогою координатної сітки з кроком 50 м. В одній із точок передбачається розміщення базової станції (БС). У цій точці будується коло радіусом 250 м, і зона покриття визначається відповідно до описаного вище алгоритму. При цьому передбачається, що абонент рухається не строго за фіксованою траєкторією, а може відхилятися від неї. Внаслідок цього алгоритм не враховує деякі точки, що розташовані в безпосередній близькості до передбачуваних місць перебування ПС. Такі точки позначені червоним кольором на рисунку 2.6.

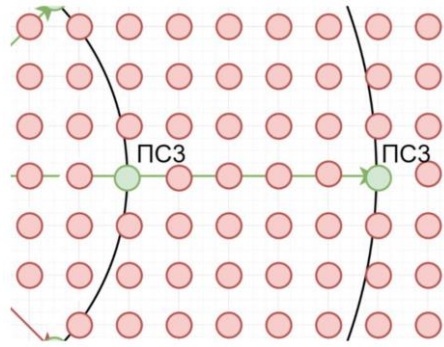


Рисунок 2.6 – Неураховані точки

Модель COST231-Nata модифікується з урахуванням додаткової інформації про висоту над рівнем моря в точках координатної сітки, що оточують передбачувані місця розташування портативної станції (ПС), оскільки реальний рух людини не є строго лінійним, і відхилення від заданої траєкторії є неминучими. Такі точки позначені синім кольором на рисунку 2.7.

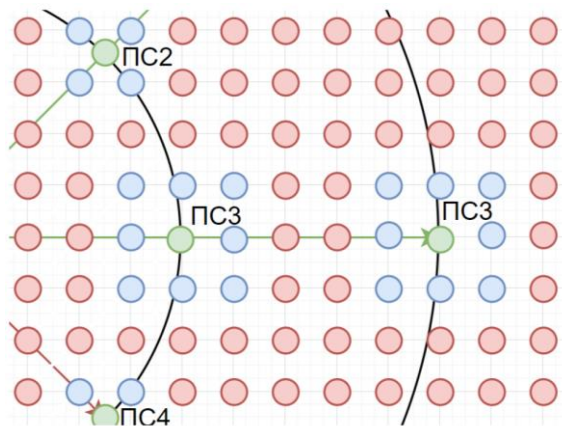


Рисунок 2.7 – Точки, суміжні з точками передбачуваного розташування портативної станції

У цьому випадку необхідно визначити висоти над рівнем моря в суміжних точках та обрати найбільше значення $h_{\text{прmax}}$, яке підставляється у формулу (2.1):

$$h_{\text{ебсмод}} = h_{\text{бс}} + h_{\text{пд}} - h_{\text{прmax}}; \quad (2.7)$$

Модифікована модель COST231-Hata набуде вигляду:

$$L_{\text{мод}} = 46,3 + 33,9 \log_{10}(f_c) - 13,82 \log_{10}(h_{\text{ебсмод}}) - a(h_{\text{пс}}) + (44,9 - 6,65 * \log_{10}(h_{\text{ебсмод}})) \log_{10}(r) + C; \quad (2.8)$$

Алгоритм розрахунку зони покриття базової станції (БС) за допомогою модифікованої моделі COST231-Hata наведено в [18].

Проведемо розрахунок зони покриття базової станції (БС) із застосуванням класичної моделі Окумура-Хата, моделі COST231-Hata та модифікованої моделі COST231-Hata. Значення параметрів, використаних у розрахунках, наведені в таблиці 2.1. Порівняння результатів розрахунку зон покриття базових станцій за різними моделями (Окумура-Хата, COST231-Hata та модифікованою COST231-Hata) представлено на рисунках 2.10 та 2.12.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики приймально-передавального обладнання базової станції (БС) та портативної станції (ПС)

Параметр	Базова станція	Портативна станція
Потужність передавача, дБм	44	30
Коефіцієнт передавання фідера, дБм	-6	0
Коефіцієнт підсилення антени, дБм	8	-6
Чутливість приймача (динамічні умови), дБм	-106	-103
Висота встановлення антени, м	50	1,5
Частота передавання сигналу, МГц	420МГц	
Висота над рівнем моря, м	212	

Допустимий рівень втрат на трасі поширення сигналу, розрахований за формулою (2.5), становить $L_d = 122$ дБ. Розрахунок рівня втрат на трасі поширення сигналу проводиться для приміської зони.

Припустимо, що базова станція (БС) розміщена в точці з висотою над рівнем моря — 212 м. Максимальна відстань між БС і портативною станцією (ПС), при якій значення рівня втрат не перевищує допустимий рівень втрат на трасі поширення сигналу, розрахований для приміської зони за моделлю Окумура-Хата, становить $r = 2,9$ км. При цьому висоти над рівнем моря в місцях розташування БС та ПС не враховуються.

Згідно з алгоритмом, спочатку розраховується зона покриття БС за моделлю COST231-Hata. Радіус кола послідовно збільшується від 250 м до значення, при якому перестає виконуватися умова (2.6). Обрано 8 напрямків, по яких буде переміщуватися ПС, з кроком 250 м. На рисунку 2.8 графічно представлені зони покриття базової станції (БС), розраховані за моделлю Окумура-Хата, які виділені помаранчевим кольором, та за моделлю COST231-Hata, виділені чорним кольором. Крок координатної сітки становить 50 м.

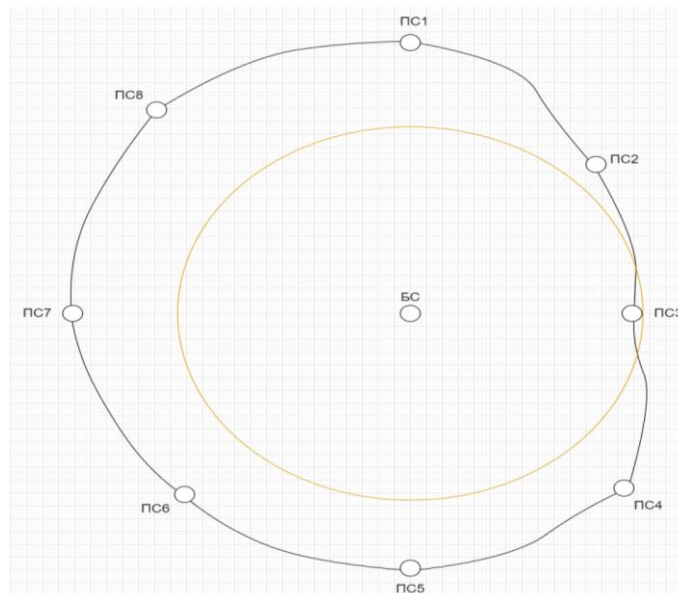


Рисунок 2.8 – Зони покриття базової станції (БС)

За результатами розрахунку видно, що модель COST231-Hata дає більш уточнені результати для конкретного розташування базової станції (БС) та портативної станції (ПС). Перевіримо отриману зону покриття за модифікованою моделлю COST231-Hata. Виконаємо розрахунок можливості передачі сигналу з восьми потенційних місць розташування абонентів до БС за модифікованою моделлю COST231-Hata. Навколо кожної з восьми передбачуваних точок розташування ПС на відстані 50 м виберемо по вісім точок. Визначимо значення висот над рівнем моря в цих точках. Найбільше значення висоти над рівнем моря буде підставлене в рівняння (2.7), після чого проведемо розрахунок втрат на трасі поширення сигналу. Результати розрахунків для всіх точок наведені на рисунку 2.9.

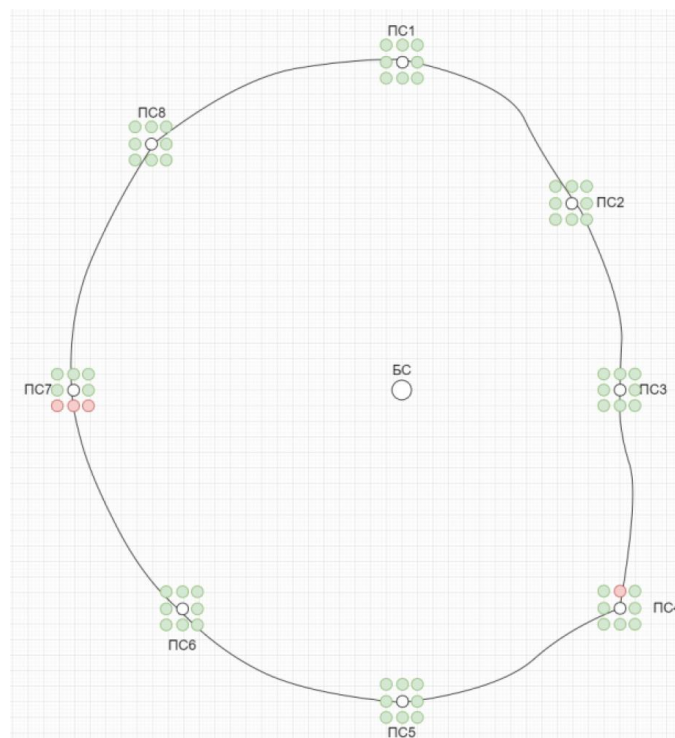


Рисунок 2.9 – Розрахунок зони покриття базової станції за модифікованою моделлю COST231-Hata

У двох місцях передбачуваного розташування портативної станції (ПС) спостерігається, що відхилення на 50 м від заданої траєкторії призводять до

втрати сигналу. Тому в цих напрямках необхідно зменшити зону покриття на 250 м. Остаточна зона покриття, розрахована за модифікованою моделлю COST231-Hata, виділена зеленим кольором, а зона покриття за моделлю COST231-Hata — червоним кольором на рисунку 2.10.

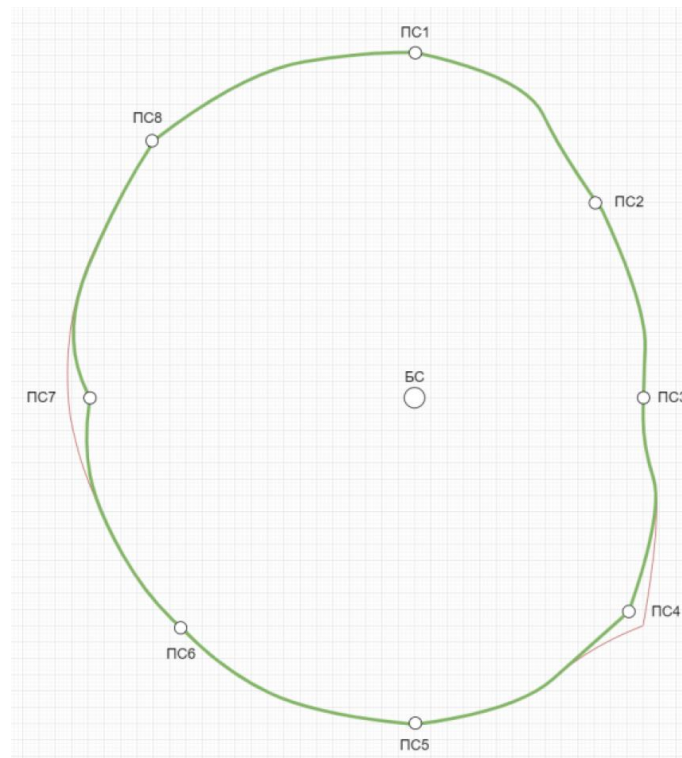


Рисунок 2.10 – Зона покриття за модифікованою моделлю COST231-Hata

Розрахунок за модифікованою моделлю COST231-Hata забезпечує найбільш гарантовану зону покриття, враховуючи рельєф місцевості не лише в потенційних місцях розташування портативної станції (ПС), а й у прилеглих точках.

2.3 Висновки до розділу 2

У розділі 2 запропоновано метод автоматизованого розміщення базових станцій транкінгових систем зв'язку, який відрізняється від існуючих підходів тим, що: на першому етапі виконуються розрахунки попередніх зон покриття

базових станцій (БС); на другому етапі проводиться уточнення зон покриття БС з урахуванням додаткових втрат, зумовлених дифракцією, тропосферним розсіюванням, втратами в атмосферному хвилеводі; на третьому етапі визначаються зони гарантованого покриття БС, а також кількість і місця їх розміщення.

Запропоновано модифіковану модель COST231-Nata, яка дає змогу більш точно обчислювати зони покриття БС, на відміну від класичної моделі COST231-Nata, завдяки врахуванню висот над рівнем моря не лише у точках розташування портативної станції (ПС), а й у суміжних точках. Представлено алгоритм розрахунку зон покриття БС із використанням модифікованої моделі COST231-Nata. Проведено порівняльний аналіз результатів розрахунків зон покриття БС за моделлю Окумура-Хата, класичною моделлю COST231-Nata та її модифікованим варіантом.

3 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ GSM В ATOLL

3.1 Аналіз та дослідження моделей поширення радіохвиль у програмному середовищі ATOLL

Програмне середовище Atoll підтримує 11 моделей поширення радіохвиль (ПРХ), що охоплюють широкий спектр безпроводових телекомунікаційних систем різного призначення — від наземних і морських рухомих служб, що функціонують у діапазоні частот нижче 400 МГц, до радіорелейних ліній зв'язку (РРЛ), які працюють на частотах до 10–18 ГГц, із використанням як фіксованих, так і мобільних приймальних станцій [22].

Перелік моделей поширення радіохвиль, реалізованих у програмі Atoll, разом із зазначенням їх особливостей та умов застосування, подано в таблиці 3.1.

При цьому доцільно відзначити такі характерні риси моделей ПРХ:

- деякі моделі призначені виключно для оцінки втрат при фіксованому розташуванні приймальних пристроїв;
- більшість моделей базується на використанні профілю місцевості (цифрова модель рельєфу — DTM) та інформації про тип перешкод на ділянці розповсюдження (clutter);
- значна частина моделей передбачає можливість урахування дифракції радіохвиль на шляху проходження сигналу між передавачем і приймачем.

Для задання моделі поширення радіохвиль (ПРХ), яка використовуватиметься в межах усього проєкту у середовищі Atoll, необхідно скористатися інструментами основного вікна програми. У панелі «Explorer» слід перейти до вкладки «Data», де потрібно відкрити контекстне меню (натиснувши праву кнопку миші) для розділу «Predictions» та обрати пункт «Properties».

У результаті відкриється діалогове вікно налаштувань (рис. 3.1), в якому на вкладці «Predictions» можна вибрати модель ПРХ, що буде застосована за замовчуванням для всього проєкту.

Таблиця 3.1 — Моделі поширення радіохвиль, реалізовані в Atoll

Модель ПРХ	Частотний діапазон	Дані, що беруться до уваги	Рекомендоване застосування
LongLey- Rice (теоретична)	~ 40 МГц	- Профіль місцевості	- Рівнинні області -Дуже низькі частоти
ITU 370-7 Vienna 93	100-400 МГц	- Профіль місцевості	-Значні відстані {d > 10 км) -Низькі частоти
ГШ 1546	30 - 3000 МГц	- Профіль місцевості	1 < d< 1000 км >Радіомовлення >Наземні та морські рухомі служок
Пи 526-5 (теоретична)	30-10000 МГц	- Профіль місцевості	- Фіксовані приймачі
WLL	30-10000 МГц	1) Профіль місцевості 2) Дифракція - детерміновані перешкоди	- Фіксовані приймачі: >Мікрохвильові лінії >WiMAX
Okumura - Hata	150 -1000 МГц	- Профіль місцевості - Дифракція - статистичні перешкоди (на стороні приймача)	1 <d< 20 км >GSM 900 > CDMA2000 >LTE
Coct-Hata	1500 - 2000 МГц	-Профіль місцевості -Дифракція - статистичні перешкоди (на стороні приймача)	1 <d< 20 км > GSM 1800 >UiiiS >LTE
ITU 529-3	300-1500 МГц	-Профіль місцевості -Дифракція - статистичні перешкоди (на стороні приймача)	1 <d< 100 KM >GSM 900 >CDMA2000 >LTE
Standard Propagation Model	150-3500 МГц	3) Профіль місцевості 4) Дифракція - статистичні перешкоди	l<d - 20 км O- GSM900 >GSM 1800 >UNITS >CDMA2000 >WiMAX >LTE (доступне автоматичне калібрування моделі)
Erceg- Greenotein (SUD	1900 - 6000 МГц	- Профіль місцевості - Дифракція - статистичні перешкоди (на стороні приймача)	- Міські і приміські області, 100 м d< S км > Фіксозании WiMAX
Sakagami Extended	3000 - 6000 МГц	-Профіль місцевості -Дифракція - статистичні перешкоди	1 <d< 20 км о WiMAX (доступне автоматичне калібрування моделі)

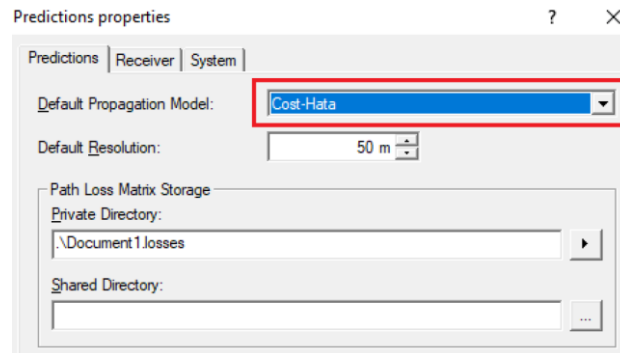


Рисунок 3.1 – Налаштування моделі ПРХ для всього проекту

Після визначення загальної моделі поширення радіохвиль (ПРХ) для всього проекту, з'являється можливість призначити її для всіх передавачів, що входять до складу проекту. З цією метою у вікні «Explorer» необхідно перейти на вкладку «Data», клацнути правою кнопкою миші на пункті «Transmitters» та обрати «Properties». У відкритому вікні в полі «Main Propagation Model» слід вказати модель, встановлену за замовчуванням для проекту (Default Model), що ілюструється на рисунку 3.2.

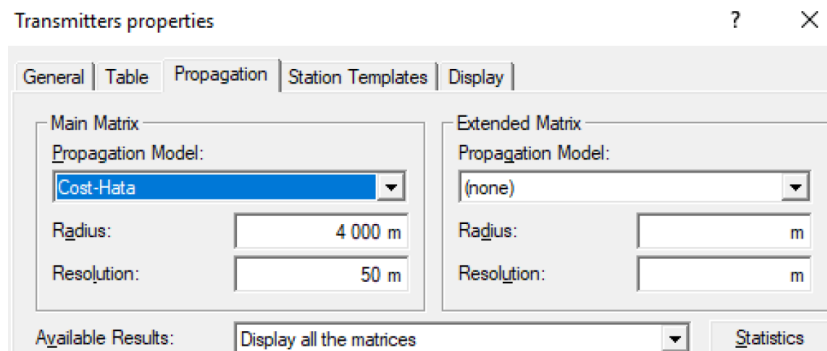
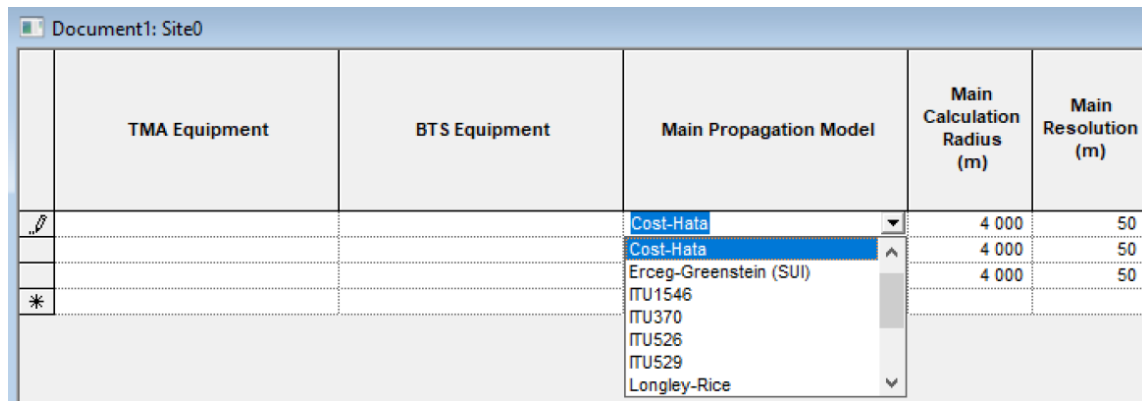


Рисунок 3.2 – Встановлення моделі ПРХ для всіх передавачів проекту

У разі необхідності призначення окремої моделі ПРХ для групи передавачів, наприклад, для конкретної базової станції, слід згрупувати передавачі за певною ознакою (наприклад, за сайтом). Для цього у вкладці «Data» потрібно клацнути правою кнопкою миші на пункті «Transmitters», обрати «Group by» → «Site»,

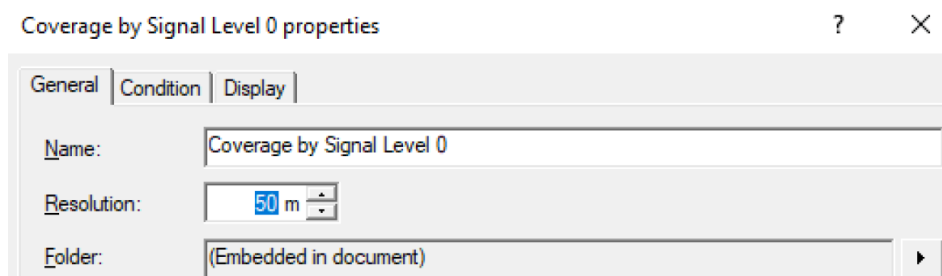
після чого вибрати відповідний сайт, відкрити контекстне меню (правою кнопкою миші) та вибрати опцію «Open Table». У таблиці, що відкриється, необхідно знайти стовпець «Main Propagation Model» і встановити відповідну модель поширення радіохвиль для кожного передавача окремо (рис. 3.3).



	TMA Equipment	BTS Equipment	Main Propagation Model	Main Calculation Radius (m)	Main Resolution (m)
			Cost-Hata	4 000	50
			Cost-Hata	4 000	50
*			Erceg-Greenstein (SUI)	4 000	50

Рисунок 3.3 – Встановлення моделі ПРХ для групи передавачів однієї БС

Потрібно врахувати, що параметр роздільної здатності матриці втрат (Resolution) задається виключно на етапі створення нового покриття. Для цього необхідно у вкладці «Predictions» обрати пункт «New» → «Coverage by Signal Level» та у вікні «Properties» вказати відповідне значення (рис. 3.4).



Coverage by Signal Level 0 properties

General | Condition | Display

Name: Coverage by Signal Level 0

Resolution: 50 m

Folder: (Embedded in document)

Рисунок 3.4 – Налаштування роздільної здатності матриці втрат

Параметри моделі поширення радіохвиль, що використовується для моделювання радіопокриття, можуть бути змінені користувачем. Для цього необхідно у вікні «Explorer» перейти на вкладку «Modules» та двічі клацнути на

відповідній моделі. У результаті відкриється вікно властивостей моделі, де можна внести необхідні зміни (рис. 3.5).

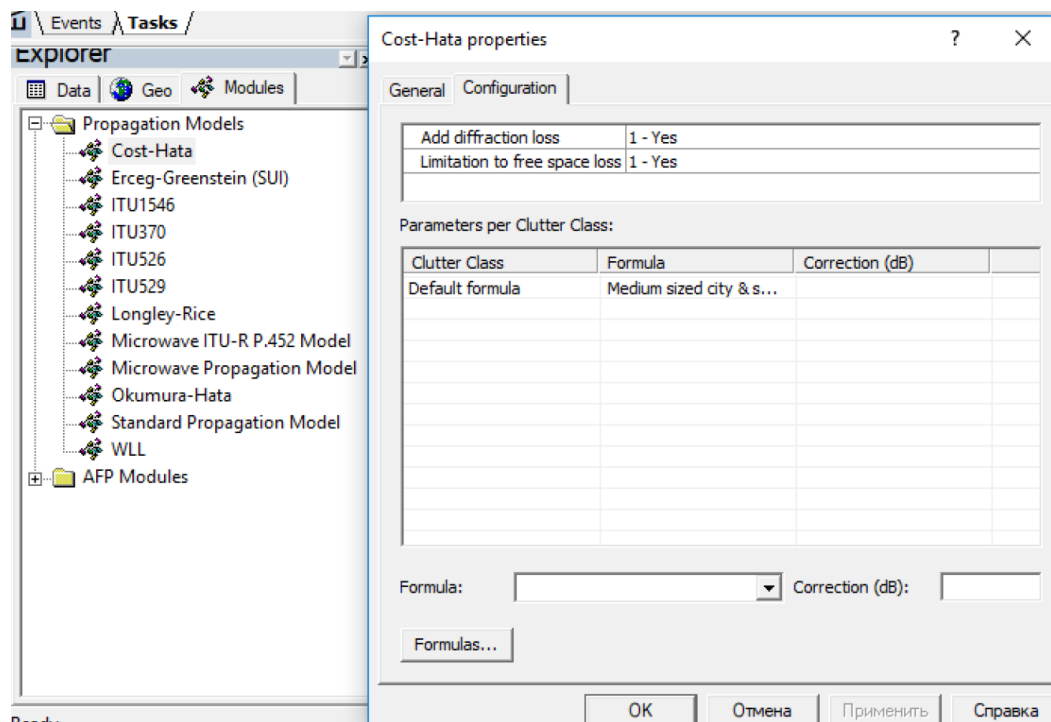


Рисунок 3.5 – Вікно властивостей моделі

У вікні властивостей моделі користувач має можливість задати формулу, яка використовуватиметься за замовчуванням для відповідної моделі (рис. 3.4), а також переглянути та, за потреби, відкоригувати вирази, закладені в алгоритм обчислень (рис. 3.5). Оскільки більшість моделей, що використовуються для розрахунку втрат потужності сигналу, потребують просторової інформації як з цифрової моделі рельєфу місцевості (DTM), так і з карти перешкод (clutter), доцільно одночасно завантажувати як карту висот рельєфу (наприклад, height.grd), так і карту перешкод та шумів (наприклад, clutter.grc) [22].

3.2 Моделювання радіопокриття системи GSM у середовищі Atoll на заданій території

Перед безпосереднім розміщенням базових станцій (БС) на цифровій карті місцевості доцільно визначити їх необхідну кількість з урахуванням вимог до абонентської ємності на заданій території. Для цього необхідно виконати послідовність розрахунків, що охоплює:

1. Визначення загальної кількості частотних каналів, виділених для побудови мережі стільникового зв'язку виконуємо за формулою (3.1)

$$n_k = \text{int} \left(\frac{F}{\Delta f_k} \right), \quad (3.1)$$

де F – смуга частот, виділена оператору за умовами ліцензії для розгортання системи стільникового зв'язку, МГц; Δf_k – смуга частот одного радіоканалу, кГц.

2. Визначення кількості частотних каналів для обслуговування абонентів в одному секторі:

$$n_{чк_сект} = \text{int} \left(\frac{n_k}{M \cdot C} \right), \quad (3.2)$$

де M – кількість секторів у стільнику; C – розмір кластеру.

3. Визначення кількості потенційних абонентів:

$$N_A = Z \cdot \mu \cdot \rho \cdot S, \quad (3.3)$$

де Z – запланована доля ринку ($Z=80\%$, не враховуючи населення, старше 12 років, та літніх людей), для GSM-900 доля ринку може складати менше 50% через низьку абонентську ємність; μ – проникність даного типу сервісу в Україні (для стільникового зв'язку $\mu=1,1$); ρ – щільність населення, чол./км², розраховується як відношення кількості населення в місті $N_{нас}$ до площі

території, яку займає місто, $S_{тер}$; S – площа території, на якій розгортають систему стільникового зв'язку, км².

4. Визначення необхідної пропускної здатності мережі для якісного обслуговування N_A абонентів (загальний трафік в мережі):

$$A_A = N_A \cdot A_0, \quad (3.4)$$

де A_0 – інтенсивність трафіку, що генерується одним абонентом, Ерл;

5. Визначення інтенсивності трафіку, що створюється однією БС.

Для цього спочатку треба визначити кількість фізичних каналів в одному секторі одного стільника:

$$N_{фк_сект} = n_{чк_сект} \cdot N_{фк}, \quad (3.5)$$

де $N_{фк}$ – кількість фізичних каналів в одному радіоканалі (для системи GSM $N_{фк} = 8$, а кількість каналів трафіка $N_{кт_сект}$ визначається таблицею 3.1).

Для визначення інтенсивності трафіку $A_{сект}$, що створюється одним сектором БС за відомим значенням блокування виклику $P_{бл}$, потрібно скористатися таблицею першої формули Ерланга – Erlang B [23].

Таблиця 3.1 – Розподіл каналів трафіку в системі GSM

Кількість частотних каналів	Кількість фізичних каналів	Кількість каналів трафіку	Канали управління
1	8	7	1
2	16	15	1
3	24	22	2
4	32	30	2
5	40	37	3
6	48	45	3
7	56	52	4
8	64	60	4
9	72	67	5
10	80	75	5
11	88	82	6
12	96	90	6

6. Визначення кількості секторів базових станцій:

$$N_{BC_сект} = \frac{A_A}{A_{сект}} . \quad (3.6)$$

7. Визначення радіусу сектора, що обслуговується одним передавачем базової станції. На цьому етапі визначається радіус покриття сектора, що обслуговується одним із трьох передавачів базової станції. У середовищі Atoll передбачено розміщення передавачів у вершинах стільникової структури. Кожен передавач забезпечує покриття одного сектора, відповідного до одного стільника, а базова станція загалом обслуговує три суміжні стільники. Таким чином, для подальших розрахунків використовується радіус одного стільника як характеристика зони покриття одного секторного передавача [23].

$$R_{см} = \sqrt{\frac{2S}{3\sqrt{3}N_{BC_сект}}} . \quad (3.7)$$

Після виконання необхідних розрахунків абонентської ємності та радіусу покриття, здійснюється перехід до етапу розміщення базових станцій (БС) на території моделювання. Об'єктами встановлення БС можуть слугувати будівлі різного функціонального призначення: промислові, адміністративні, житлові споруди, а також будівлі суспільного призначення. Антенні системи можуть монтуватися як на спеціальні металоконструкції, встановлені на дахах чи фасадах будівель, так і на інженерні споруди – освітлювальні опори, димарі тощо. Для візуалізації стільникової структури в середовищі Atoll, перед розміщенням БС на карті місцевості необхідно активувати режим відображення гексагональної сітки. Для цього слід перейти на вкладку «Data» та встановити позначку навпроти опції «Hexagonal Design» (рис. 3.6).

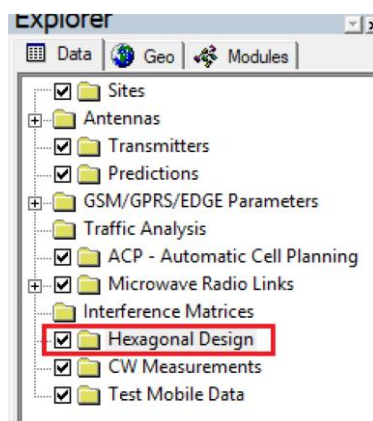


Рисунок 3.6 – Відображення стільникової структури на карті

На етапі налаштування параметрів базових станцій у середовищі Atoll необхідно вказати обчислене значення радіусу стільника. Це значення вводиться в поле «Hexagon Radius» у відповідному вікні параметрів (рис. 3.7), що забезпечує коректне відображення гексагональної структури покриття.

Після завершення процесу розміщення базових станцій слід виконати моделювання радіопокриття за рівнем сигналу. Для цього обирається опція «Coverage by Signal Level», яка дозволяє згенерувати карту сигналу на заданій території [23].

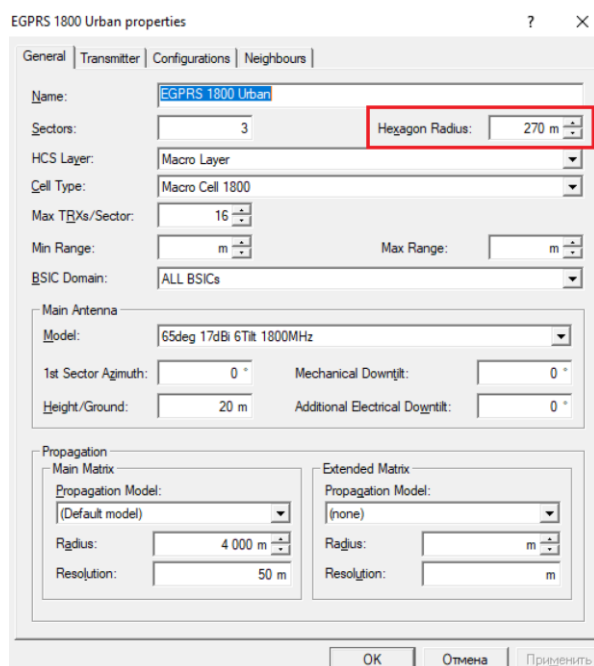


Рисунок 3.7 – Встановлення значення радіусу стільника

За результатами моделювання необхідно провести аналіз статистичних показників покриття, зокрема рівнів сигналу в різних зонах моделі (рис. 3.8 – 3.9). Для отримання розширених статистичних даних щодо якості радіопокриття у середовищі Atoll необхідно клацнути правою кнопкою миші на результатах моделювання «Coverage by Signal Level» та обрати пункт «Generate Report», а не «Histogram» (рис. 3.8). Згенерований звіт надає детальну інформацію про площу покриття, розподіл рівнів сигналу, а також дозволяє провести якісний аналіз відповідності покриття заданим вимогам. Моделювання радіопокриття вважається завершеним за умови, що частка території з рівнем сигналу нижче порогового значення чутливості мобільної станції (-100 дБм) не перевищує 10%. У випадку перевищення цього порогового значення рекомендується внести корективи в проєктну модель, а саме: змінити висоту підвісу антени базової станції; переглянути місце розміщення обладнання БС (наприклад, перемістити його на сусідню будівлю з більшою висотою); додати додаткову базову станцію в зоні недостатнього покриття [23].

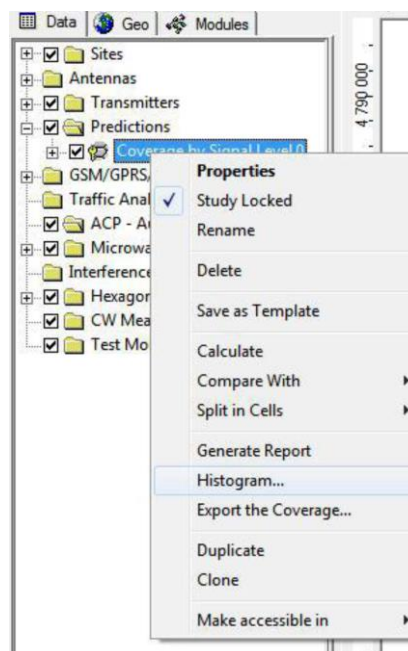


Рисунок 3.8 – Виклик статистики радіопокриття за допомогою гістограми

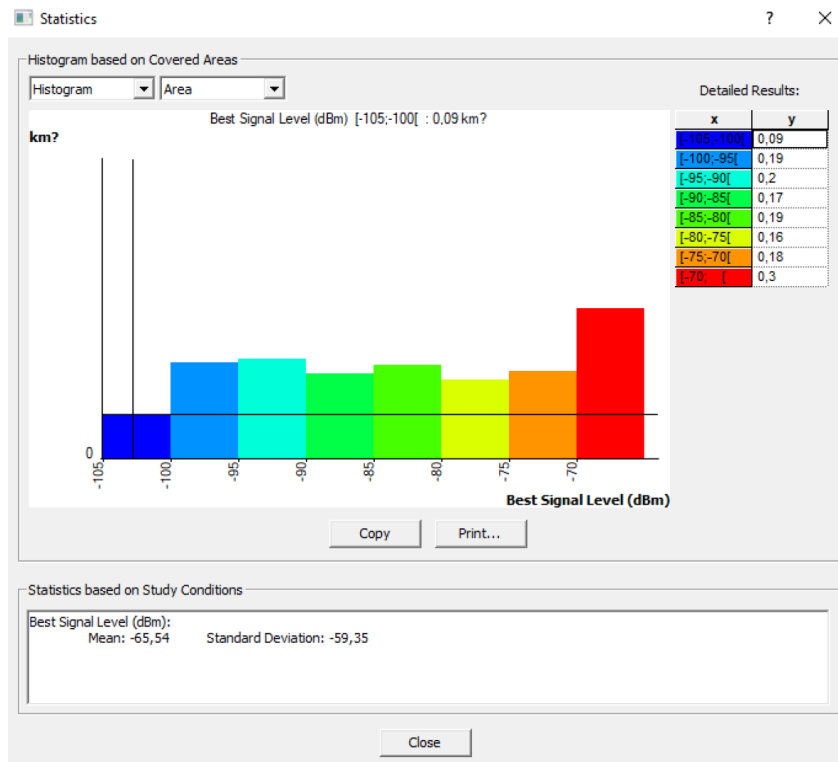


Рисунок 3.9 – Статистика радіопокриття за рівнем сигналу

3.3 Моделювання радіорелейної лінії у телекомунікаційній мережі

Для забезпечення зв'язку базових станцій (БС) із контролером найчастіше використовуються орендовані стаціонарні канали зв'язку. Однак, у ряді випадків їх кількість є обмеженою або недоступною, що зумовлює необхідність організації власних каналів передавання даних. Прокладання власних стаціонарних ліній, особливо в умовах щільної міської забудови, є технічно складним, малоефективним та економічно недоцільним.

Рациональним рішенням у таких умовах є впровадження власної радіорелейної мережі, яка являє собою сукупність приймально-передавальних пристроїв з вузькоспрямованими антенами, що забезпечують точку-точковий зв'язок між вузлами мережі. Одним з прикладів сучасного радіорелейного обладнання, яке використовується в стільникових мережах, є система Ericsson Mini Link. Це рішення призначене для організації радіоканалів передачі на

невеликі відстані (до кількох десятків кілометрів), що робить його придатним для створення з'єднань між базовими станціями та контролером.

Система характеризується компактними габаритами, що значно спрощує вимоги до умов встановлення. Типова конфігурація Ericsson Mini Link включає антенно-радіомодуль, параболічну антену (виносна підсистема) та модуль доступу, який встановлюється у приміщенні (рис. 3.10). Зв'язок між підсистемами здійснюється за допомогою коаксіального кабелю. Антенно-радіомодуль може бути встановлений на щоглі або висотній будівлі за умови забезпечення прямої видимості між пунктами встановлення [23].



Рисунок 3.10 – Вигляд виносної підсистеми Ericsson Mini Link

Модуль доступу в системі Ericsson Mini Link є незалежним від частотного діапазону та містить модем, комутаційно-мультиплексорний блок і сервісний модуль, що забезпечує моніторинг стану каналів у межах усієї радіорелейної мережі. Існують два основні типи організації підключення базових станцій до контролера (рис. 3.11): деревоподібна (ієрархічна) структура з'єднань ; сіткоподібна (мезоскопічна) структура з'єднань.

Деревоподібна архітектура є економічно ефективнішою, однак має суттєвий недолік — вихід з ладу окремої ділянки призводить до втрати зв'язку з усіма базовими станціями, підключеними до неї нижчим рівнем. Сіткоподібна архітектура забезпечує високу надійність і відмовостійкість мережі за рахунок

наявності альтернативних маршрутів передачі даних, однак вимагає значно більших інвестицій в інфраструктуру. На практиці найчастіше використовується комбінований підхід, що передбачає деревоподібне з'єднання з елементами резервування у вигляді замкнених петель. Такий підхід дозволяє досягти балансу між економічною доцільністю та експлуатаційною надійністю мережі.

У цілому, впровадження власних радіорелейних ліній зв'язку не лише вирішує проблему організації з'єднань із новими базовими станціями, а й дозволяє створювати обхідні маршрути та резервні шляхи у випадку відмов окремих елементів мережі [23].

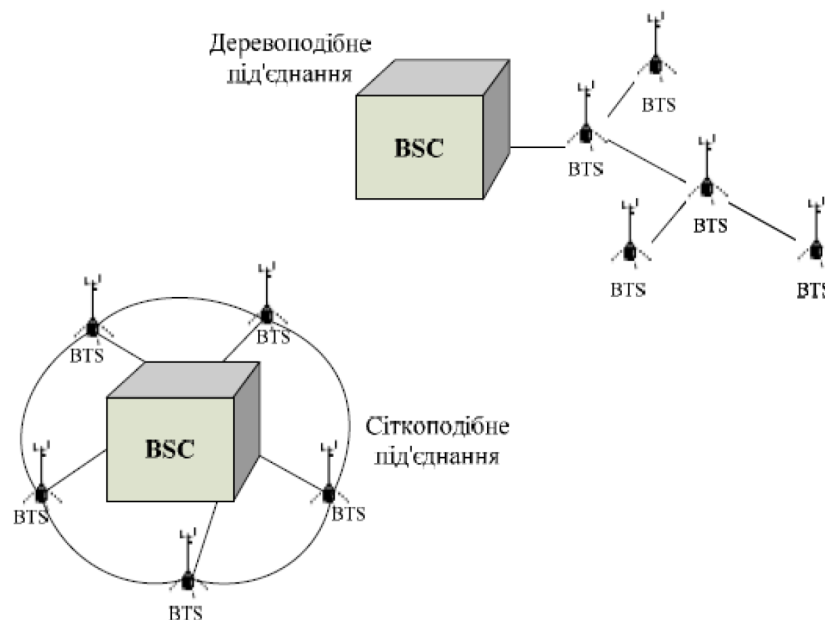


Рисунок 3.11 – Схеми під'єднання базових станцій до контролера BSC

Для виконання моделювання радіорелейного з'єднання між двома базовими станціями у програмному середовищі Atoll на початковому етапі необхідно задати систему координат, яка відповідає географічному розташуванню цільової території. Це здійснюється через меню Tools → Options на вкладці Coordinates (рис. 3.12). Перед безпосереднім створенням радіорелейної лінії необхідно внести певні зміни до поточного проєкту, а саме:

На цифровій карті місцевості (вкладка Geo) слід видалити шар висот рельєфу (height), залишивши лише шар висот будівель (uildings). У разі наявності обох шарів профіль радіолінії може відображатися некоректно. Додатково рекомендовано зробити шар Digital Terrain Model невидимим, знявши відповідну позначку у вікні відображення шарів (рис. 3.13).

Деактивувати відображення результатів моделювання покриття за рівнем сигналу, знявши позначку навпроти відповідного шару у вкладці Data. Зазначені дії забезпечують коректне функціонування модуля побудови радіорелейної лінії та правильне формування профілю траси між базовими станціями [23].

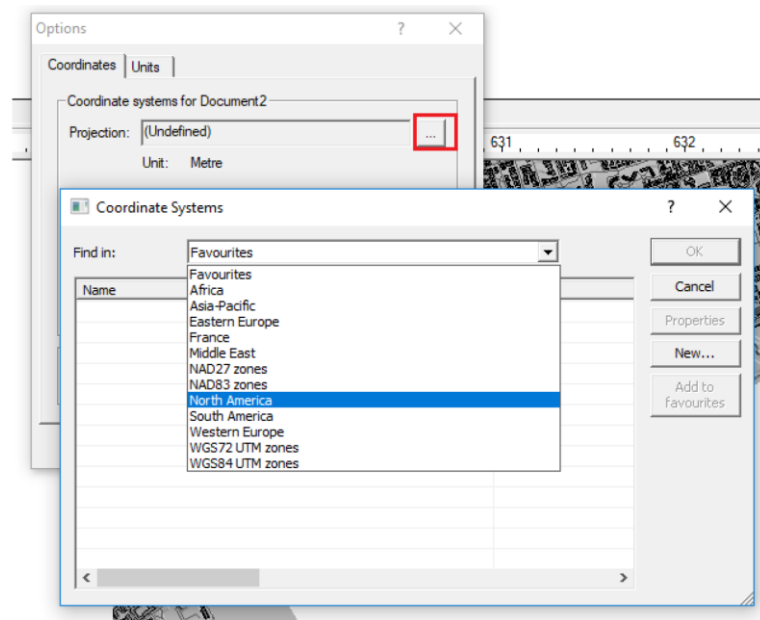


Рисунок 3.12 – Вибір системи координат

Після виконання попередніх налаштувань проєкту в середовищі Atoll можна переходити до побудови радіорелейного з'єднання між двома базовими станціями (БС). Для цього на панелі інструментів конфігурації радіорелейних ліній (рис. 3.14) необхідно обрати опцію «Height Profile», після чого вказати пари БС, між якими планується прокладення радіорелейної лінії (РРЛ) [23].

Після з'єднання обраних точок на цифровій карті місцевості з'явиться відповідна лінія. Далі слід клацнути на ній правою кнопкою миші та в

контекстному меню обрати команду «Create Link» (рис. 3.15), що ініціює створення РРЛ з урахуванням топографічного профілю траси.

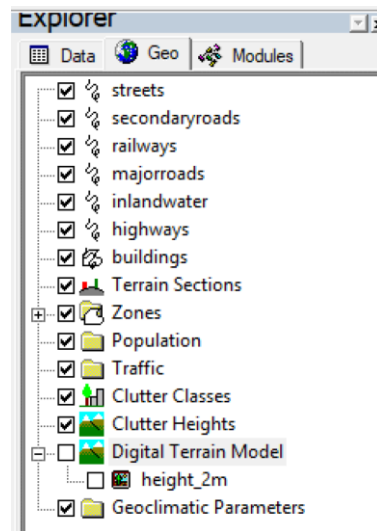


Рисунок 3.13 – Вибір системи координат

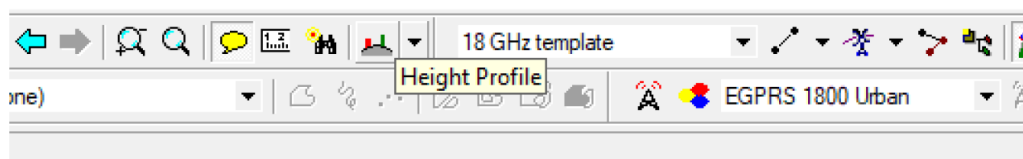


Рисунок 3.14 – Панель конфігурації РРЛ

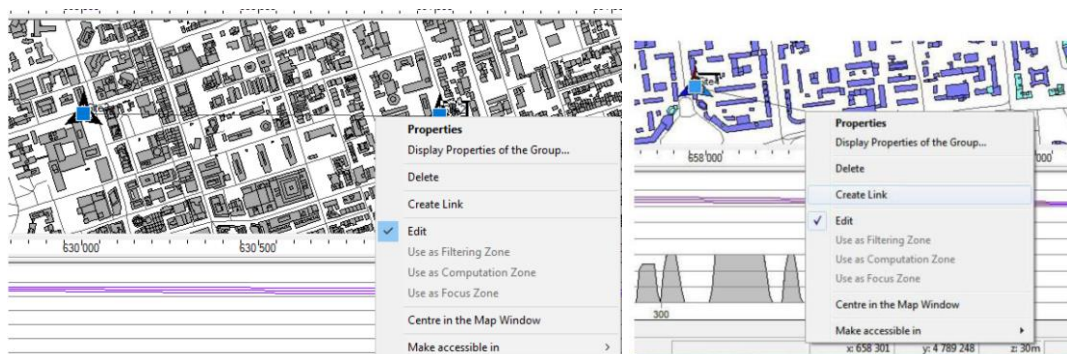


Рисунок 3.15 – Створення РРЛ

За замовчуванням у початкових параметрах створення радіорелейної лінії (РРЛ) висота підвісу антени встановлюється на рівні 50 м. Проте в реальних

умовах експлуатації антени радіорелейного обладнання, як правило, розташовуються на тій самій висоті, що й антени базових станцій (БС). Для коригування цього параметра необхідно двічі клацнути по створеній РРЛ та у вікні властивостей перейти на вкладку «Radio», де в полі «Antenna, Height/Ground» задати актуальну висоту розміщення антени. Звертається увага, що зазначене налаштування необхідно виконати для обох сайтів, які формують відповідну РРЛ. У результаті після оновлення параметрів формується оновлений профіль траси радіолінії, приклад якого наведено на рис. 3.16.

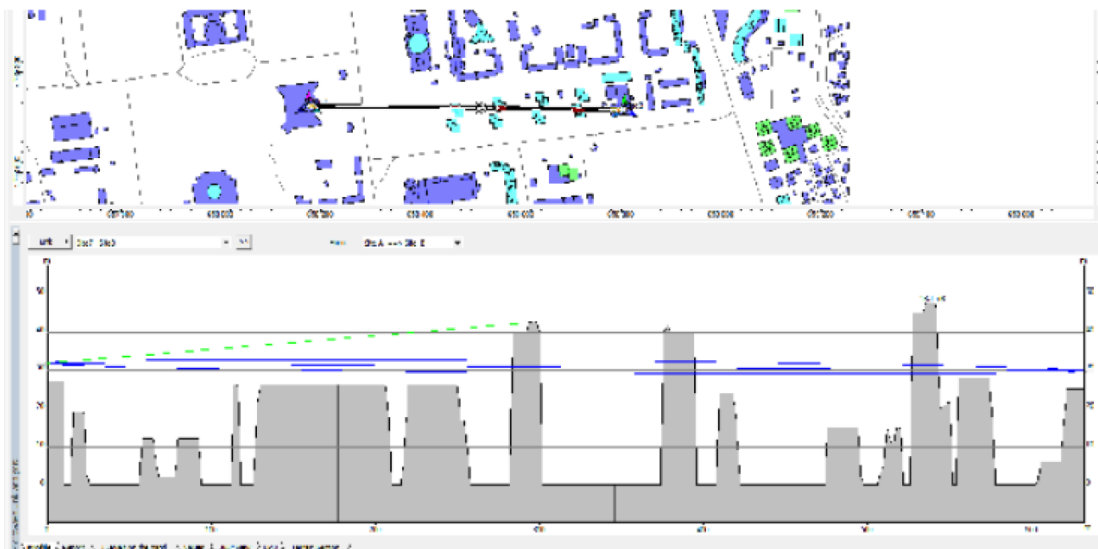


Рисунок 3.16 – Профіль РРЛ

Як видно з рисунка 3.16, на трасі радіорелейної лінії присутні три перешкоди, які блокують пряму видимість між передавальною та приймальною антенами. У такій ситуації створити надійний радіорелейний канал зв'язку без додаткових технічних засобів неможливо, оскільки відсутність прямої видимості призводить до втрати сигналу. Для вирішення цієї проблеми застосовують спеціалізовані пристрої — повторювачі (Repeaters), які забезпечують ретрансляцію сигналу між двома ділянками РРЛ. Щоб вставити повторювач, необхідно клацнути правою кнопкою миші на відповідній лінії РРЛ, обрати опцію «Insert Repeater», а потім вказати точку його встановлення таким чином,

щоб була забезпечена пряма видимість між повторювачем і кожним з двох сайтів, що формують лінію зв'язку (рис. 3.17).

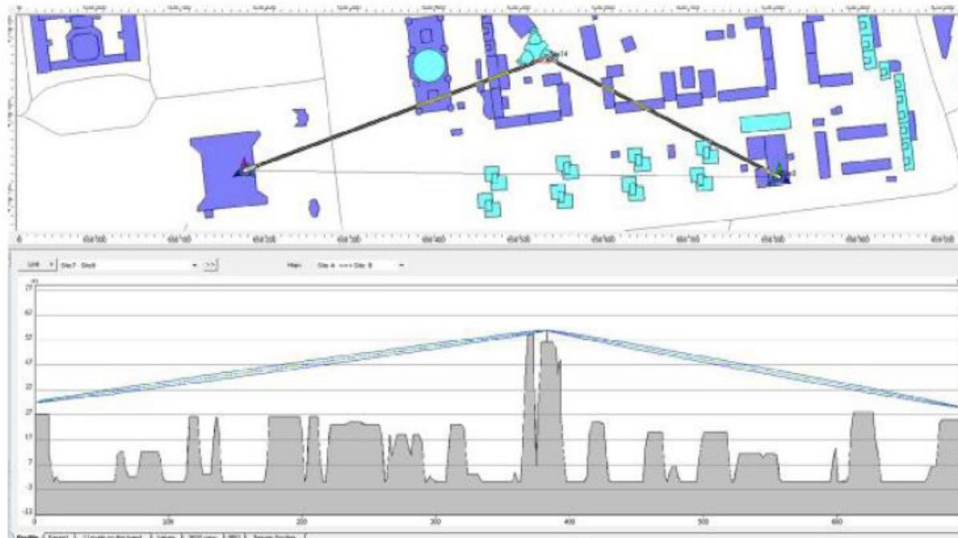


Рисунок 3.17 – Профіль РРЛ з повторювачем

У початкових налаштуваннях висота підвісу антени повторювача становить 30 м. Для її зміни потрібно двічі клацнути на лінії РРЛ та відкоригувати значення висоти відповідно до інструкцій, наведених на рисунку 3.18.

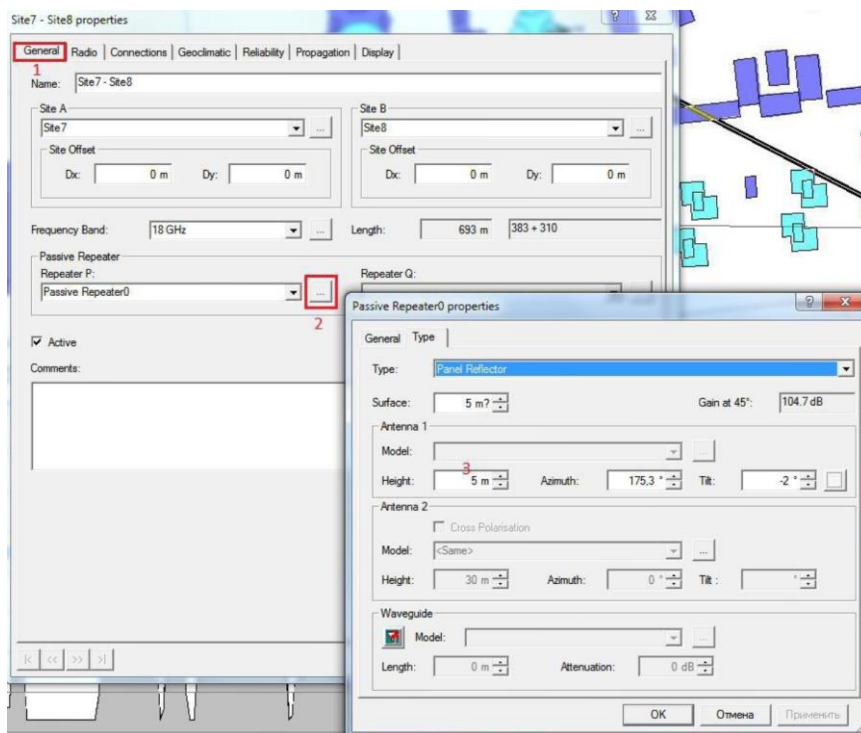


Рисунок 3.18 – Зміна висоти антени повторювача РРЛ

Аналогічним чином може бути реалізоване підключення всіх базових станцій мережі до контролера, з використанням структур з'єднання, наведених на рисунку 3.11.

3.4 Принципи розподілу робочих частот базових станцій системи GSM у середовищі Atoll

Смуга частот, виділена системі стільникового зв'язку, формується із сукупності частотних груп (frequency groups) та частотних областей (frequency domains). У межах проекту вона визначається набором частот, зарезервованих для систем GSM/GPRS/EDGE на території, що охоплюється мережею, і розглядається як фіксована величина. Натомість частотні групи й області можуть змінюватися або призначатися користувачем вручну. Частотна область є підмножиною доступної смуги частот і містить одну або кілька частотних груп, кожна з яких представляє набір частотних каналів.

У середовищі моделювання Atoll кожному передавачу базової станції (БС) призначається унікальний ідентифікатор — BSIC (Base Station Identity Code), який у поєднанні з номером каналу BCCH (Broadcast Control Channel) однозначно ідентифікує передавач у відповідному секторі (рис. 3.19). Структура BSIC складається з Network Colour Code (NCC) та Base Station Colour Code (BCC), що дозволяє уникати конфліктів між сусідніми передавачами. Значення BSIC можуть змінюватися залежно від країни та регіону розгортання мережі. У Atoll ідентифікатори BSIC організовуються у вигляді груп і областей, які, як і частотні канали, можуть призначатися як вручну, так і автоматизовано. Зокрема: BSIC-область містить одну або кілька BSIC-груп; BSIC-група є впорядкованим набором допустимих кодів BSIC.

Процедура розподілу частот і BSIC повинна враховувати кількість частотних каналів $n_{чк_с}$, які відповідають кількості встановлених TRX-модулів (приймально-передавальних модулів) на відповідному секторі БС. Це значення визначається відповідно до кроків 1–2 алгоритму розрахунку кількості БС,

викладеного у підрозділі 3.1. Необхідно також брати до уваги обмеження, що стосуються частотного планування — розподіл частотних каналів здійснюється лише в межах кластера C, що визначає кількість стільників, у яких частотні групи не повторюються. На території обслуговування допускається наявність кількох кластерів з повторюваними частотами, що може призводити до ко-канальних завад (co-channel interference), які необхідно враховувати при плануванні радіомережі.

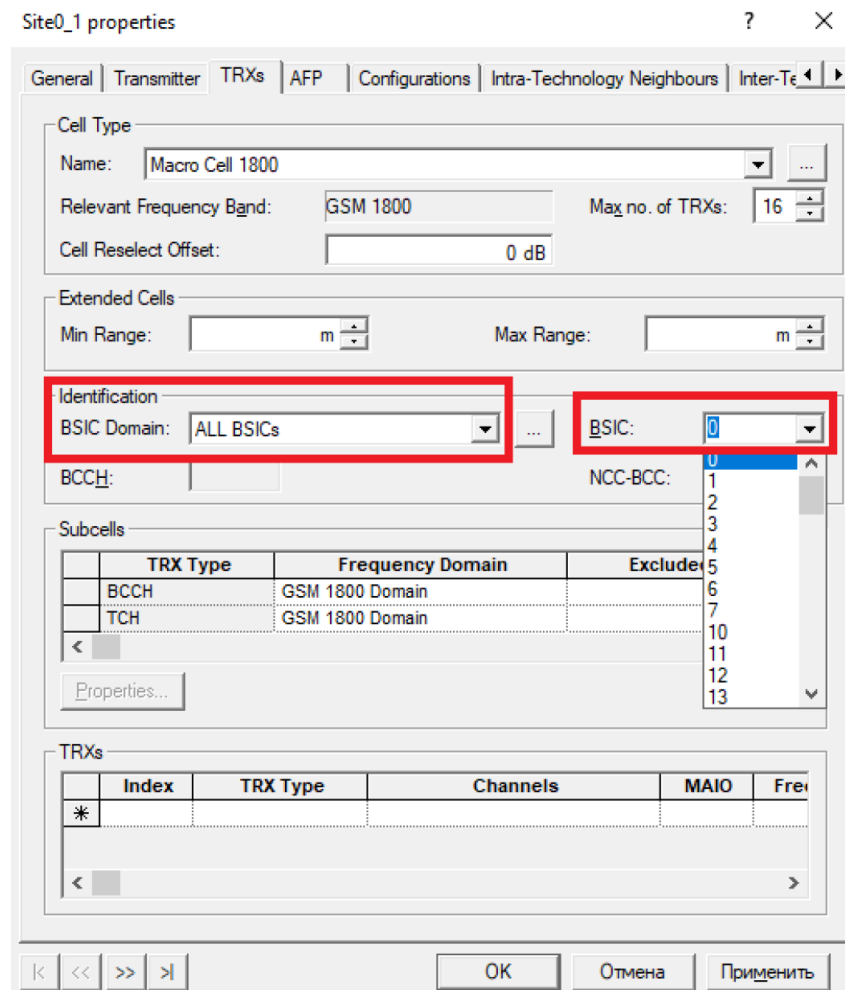


Рисунок 3.19 – Призначення області BSIC та ідентифікатора BSIC для передавача Site0_1

Процес ручного призначення значень BSIC та частотних каналів у середовищі Atoll виконується поетапно. Для кожного передавача необхідно:

1. Відкрити папку «Transmitters», обрати конкретний передавач (наприклад, Site0_1), натиснути на ньому правою кнопкою миші та перейти до пункту «Properties».

2. На вкладці «TRXs» встановити в полі «BSIC Domain» значення «All BSICs», а в полі «BSIC» — обрати відповідний ідентифікатор. Рекомендується призначати різні значення BSIC для кожного передавача в межах одного десяткового діапазону. Після завершення налаштування BSIC можна перейти до розподілення частотних каналів для всіх передавачів. Для цього: Необхідно клацнути правою кнопкою миші на папці «Transmitters»; Обрати пункт «Subcells» → «TRXs»; У результаті відкриється таблиця з конфігурацією всіх TRX-модулів у проєкті (рис. 3.20), яка дозволяє виконати ручне або автоматизоване налаштування частотного плану.

Transmitter	Index	TRX Type	Channels	MAIO	Freeze channels and MAIO	TRX Configuration	EDGE Power Backoff (dB)	TRX Rank
Site0_1	0	BCCH	512		☒	Standard	3	0
Site0_1	1	TCH	513		☒	Standard	3	0
Site0_2	0	BCCH	514		☒	Standard	3	0
Site0_2	1	TCH	515		☒	Standard	3	0
Site0_3	0	BCCH	516		☒	Standard	3	0
Site0_3	1	TCH	517		☒	Standard	3	0
*					☐			

Рисунок 3.20 – Вигляд вікна, що ілюструє частотний план

Призначення частотних каналів передавачам виконується за допомогою заповнення таблиці TRX-конфігурації у вікні «Subcells → TRXs». Послідовність дій під час внесення даних до таблиці має вигляд:

1. У стовпці Transmitter вибирається необхідний передавач, для якого виконується налаштування.

2. У стовпці TRX type встановлюється тип радіоканалу: принаймні один модуль у секторі має бути призначений як BCCH; решта модулів – TCH (Traffic Channel).

3. У стовпці Channels задається номер частотного каналу, що відповідає цьому TRX.

4. Необхідно встановити прапорець Freeze channels, щоб зафіксувати призначений канал і запобігти його автоматичній зміні при наступному перерахунку конфігурації.

5. У стовпці TRX configuration вибирається відповідна конфігурація TRX (зазвичай — стандартна).

6. Після внесення параметрів слід клацнути в полі нового запису для його збереження.

Вказану послідовність дій потрібно повторити для всіх передавачів і кожного TRX-модуля в межах проєкту. При цьому кількість TRX на сектор повинна відповідати кількості частотних каналів $n_{\text{чк}_c}$, які заплановані для відповідного сектору згідно з частотним планом. Після внесення всіх записів необхідно переконатися, що кожен частотний канал належить до частотної області, яка відповідає проєкту. У більшості випадків використовується GSM 1800 Domain або GSM 900 Domain (рис. 3.21, поз. 1). Якщо будь-який з параметрів було введено некоректно, його можна змінити, відкривши властивості відповідного передавача на вкладці TRXs (рис. 3.21, поз. 2). Після завершення розподілу частотних каналів можна експортувати сформований частотний план до зовнішнього файлу, наприклад, у форматі Excel. Для цього слід: відкрити таблицю частотного плану (рис. 3.20), виділити всі рядки даних (наприклад, натиснувши Ctrl+A), клацнути правою кнопкою миші на виділеній області й обрати команду Export (рис. 3.22), у вікні експорту (рис. 3.23) натиснути кнопку Export ще раз і вказати бажаний формат файлу. Таким чином, у середовищі Atoll реалізовано зручний механізм ручного розподілу частот і BSIC-ідентифікаторів, що дозволяє точно контролювати параметри кожного передавача та формувати оптимальну конфігурацію мережі відповідно до заданих умов покриття й частотного плану [23].

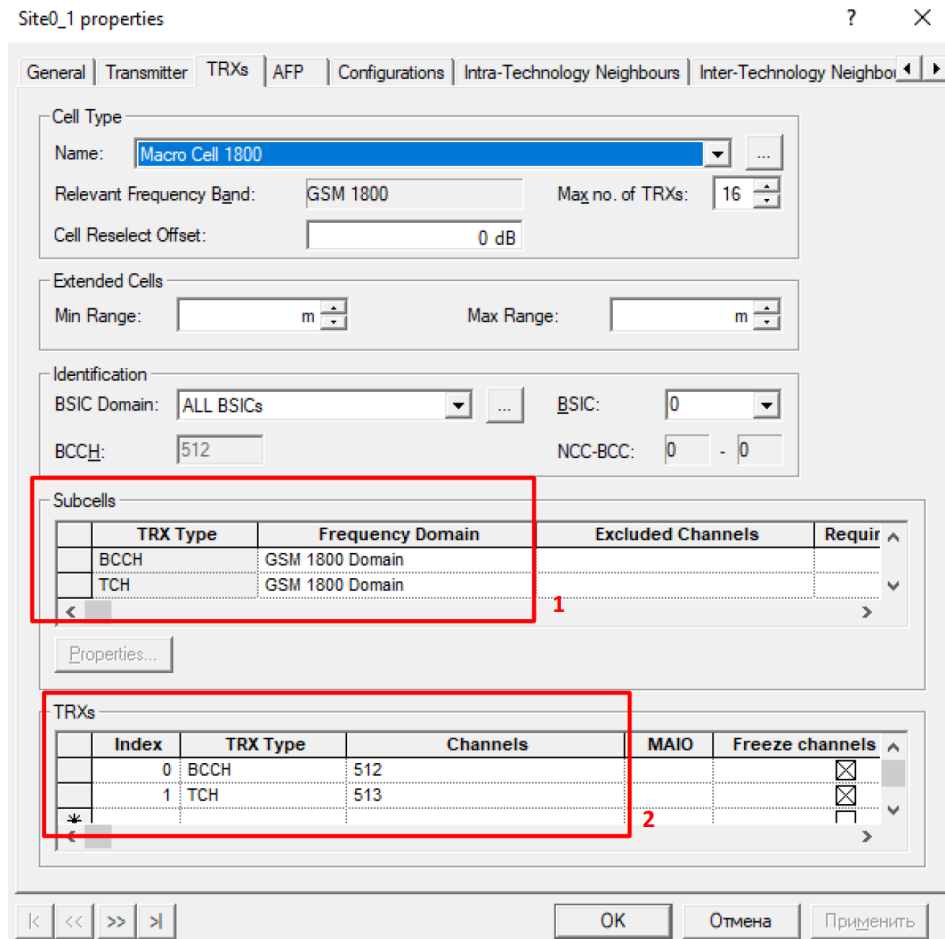


Рисунок 3.21 – Коригування параметрів окремо взятого передавача

У програмі Atoll реалізована можливість виконання точкового аналізу шляхом розміщення мобільної станції (МС) у довільній точці на карті радіопокриття. Такий підхід дозволяє провести детальну оцінку параметрів сигналу у конкретному місці, що має важливе значення для аналізу якості покриття та планування мережі.

Під час точкового аналізу визначаються:

- рівень сигналу, прийнятого від передавачів різних базових станцій (БС), що дає змогу визначити найбільш ефективну БС, яка обслуговуватиме МС у цій точці;
- профіль радіолінії між МС та сектором відповідної БС, що дозволяє оцінити параметри радіоканалу і можливі перешкоди;

- рівні інтерференційних завад, у тому числі завад у сусідньому каналі, що є критичним для оцінки якості зв'язку та планування частотного ресурсу. Застосування точкового аналізу в Atoll сприяє підвищенню точності моделювання покриття, виявленню «мертвих зон» та оптимізації конфігурації мережі. Для активації режиму точкового аналізу в середовищі Atoll необхідно скористатися інструментом Point Analysis Tool, який викликається натисканням відповідної кнопки на панелі інструментів (рис. 3.24). У цьому режимі користувач має змогу обрати довільну точку на карті покриття для виконання детального аналізу параметрів радіосигналу [23].

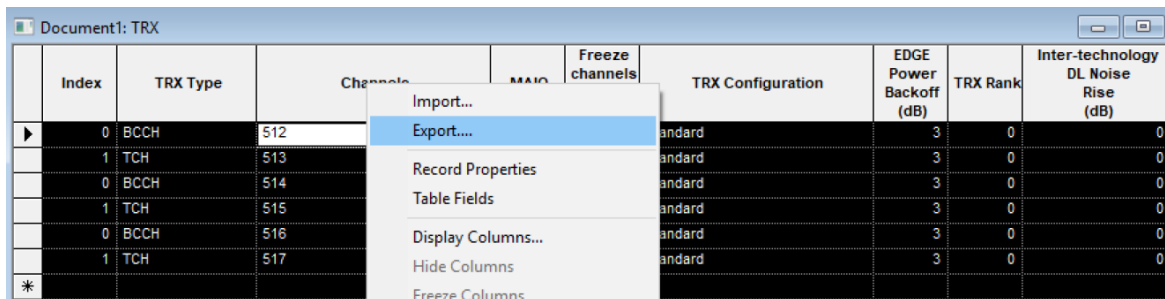


Рисунок 3.22 – Експортування частотного плану в файл

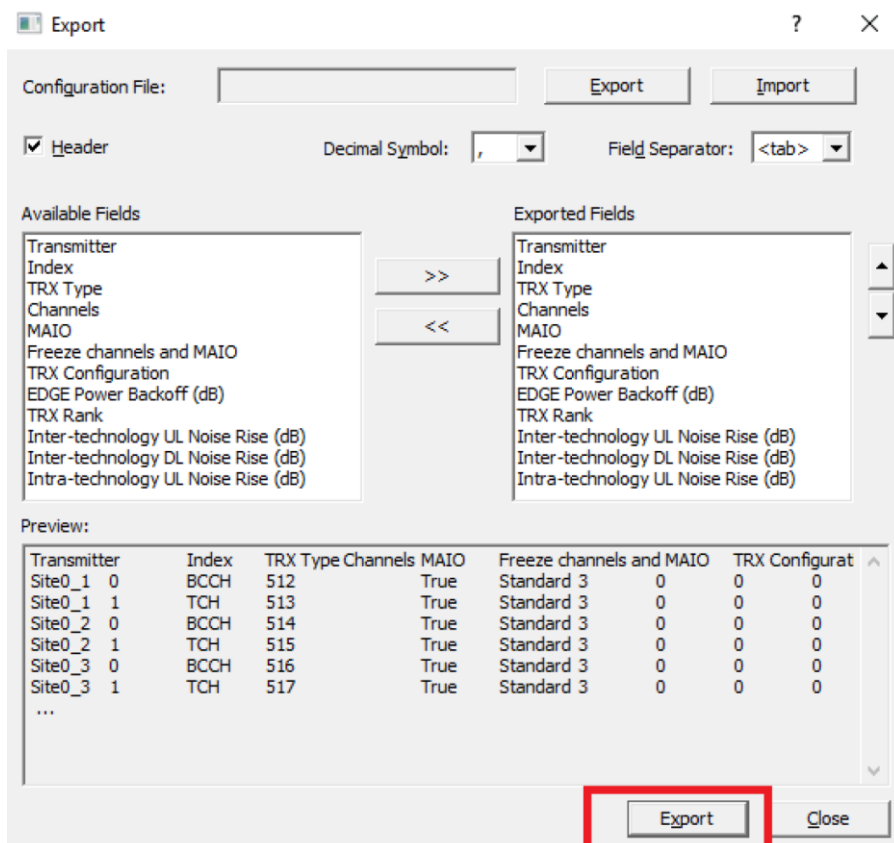


Рисунок 3.23 – Вікно експортування даних

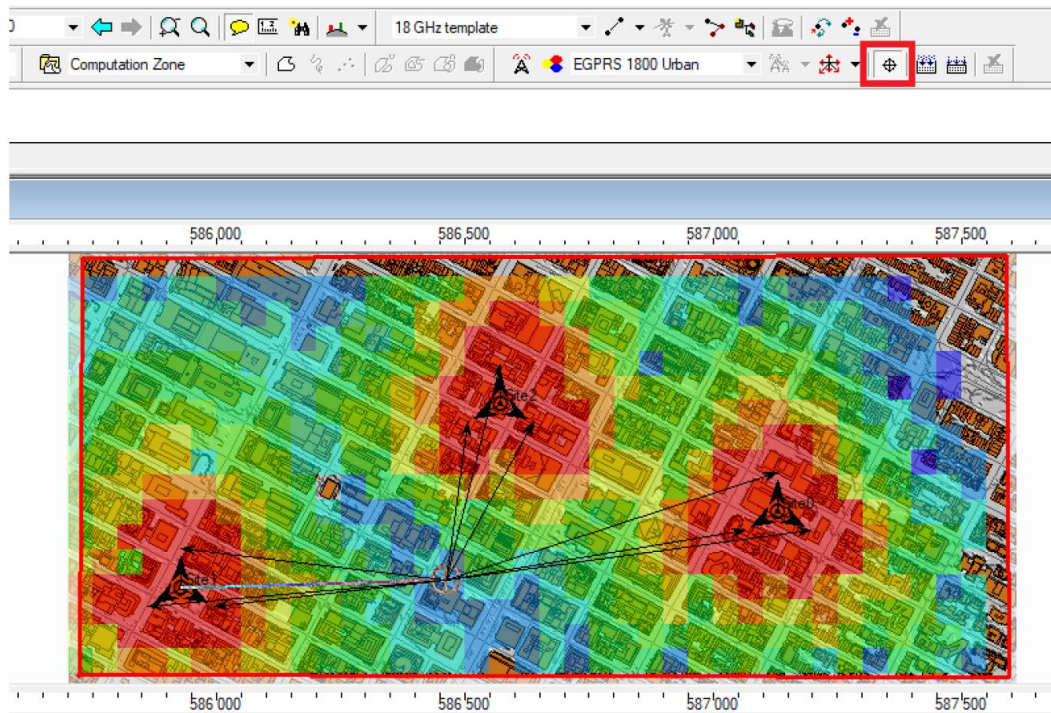


Рисунок 3.24 – Викликання режиму точкового аналізу

Після вибору довільної точки на карті покриття за допомогою миші відкривається вікно Point Analysis Tool (рис. 3.25), яке за замовчуванням активується у вкладці Reception. У цій вкладці користувач може оцінити рівень сигналу в заданій точці від передавачів різних базових станцій і визначити сектор БС, який забезпечує обслуговування мобільної станції (МС) у цій точці.

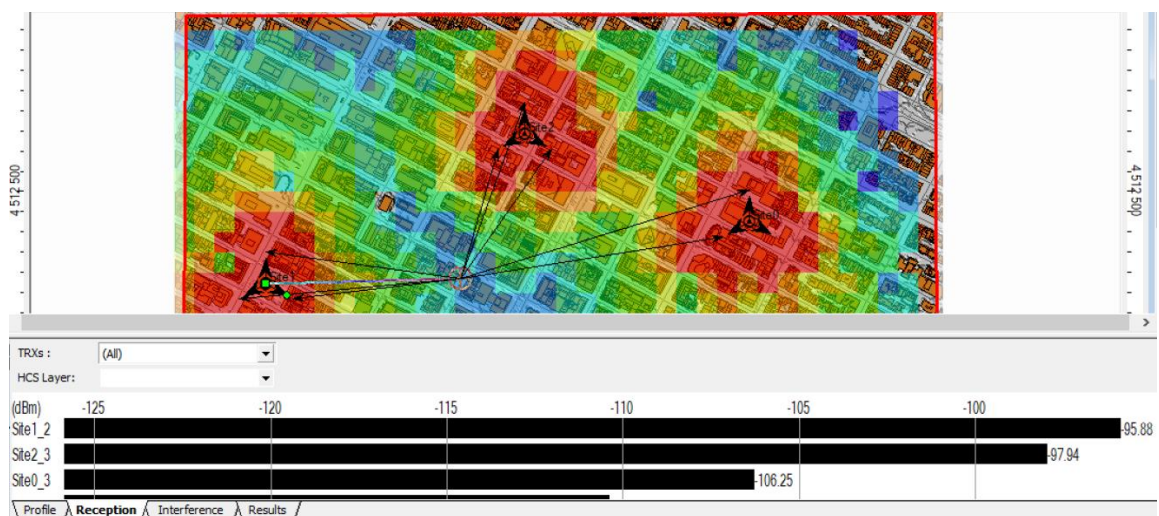


Рисунок 3.25 – Режим точкового аналізу

Перейшовши до вкладки Profile, можна проаналізувати профіль радіолінії між МС та відповідним сектором БС. У вкладці Interference представлено рівні інтерференцій, що створюються сусідніми передавачами, а зведена інформація щодо завадової обстановки подається у вкладці Results.

3.5 Висновки до розділу 3

Здійснено комплексне моделювання системи стільникового зв'язку стандарту GSM у програмному середовищі Atoll, з акцентом на дослідженні особливостей поширення радіохвиль, формуванні зон радіопокриття, моделюванні радіорелейних ліній та розподілі частот між базовими станціями. Отримані результати дозволяють сформулювати наступні висновки:

1. Виконано аналіз моделей поширення радіохвиль, реалізованих у середовищі Atoll, зокрема моделей Okumura-Hata, COST-Hata та Ericsson. Встановлено, що для міської забудови середньої щільності найбільш адекватні результати забезпечує модель Okumura-Hata з урахуванням калібрування на основі емпіричних даних.

2. Проведено моделювання радіопокриття системи GSM на заданій території, з урахуванням рельєфу місцевості, типу забудови та висоти підвісу антен. Отримані карти покриття дали змогу виявити зони зі слабким сигналом, що дозволяє в подальшому коригувати параметри базових станцій для покращення якості обслуговування.

3. Змодельовано радіорелейну лінію, яка використовується для міжстанційного зв'язку в GSM-мережі. Проаналізовано профіль радіолінії та визначено наявність або відсутність перешкод у зоні прямої видимості. Розрахунок параметрів радіорелейного з'єднання підтвердив його ефективність при заданих умовах (висоти антен, відстань, тип місцевості).

4. Розглянуто принципи розподілу частот між базовими станціями системи GSM у середовищі Atoll. Здійснено частотне планування з дотриманням умов мінімізації міжканальних інтерференцій. Продемонстровано можливості

ручного та автоматизованого розподілення частот з використанням відповідних інструментів Atoll, зокрема модулів «Frequency Plan» та «Automatic Allocation».

Таким чином, проведене моделювання підтверджує ефективність програмного комплексу Atoll як інструменту для проектування та оптимізації систем стільникового зв'язку стандарту GSM, з можливістю інтеграції як радіотехнологічного, так і транспортного рівня мережі.

4 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ UMTS ТА LTE В ПРОГРАМІ ATOLL

4.1 Моделювання параметрів радіопокриття системи UMTS на визначеній території за допомогою програмного середовища Atoll

Універсальна мобільна телекомунікаційна система (UMTS) належить до систем стільникового зв'язку третього покоління (3G) та базується на технології широкосмугового доступу з кодовим розділенням каналів (WCDMA). На відміну від систем з частотно-часовим розділенням каналів, таких як GSM (FDMA/TDMA), у системі UMTS можливе функціонування передавачів сусідніх базових станцій (БС) на однакових радіочастотах. Ідентифікація кожного передавача здійснюється за допомогою унікальної розширювальної послідовності (scrambling code), а розділення каналів або користувачів забезпечується ортогональними кодовими послідовностями з регульованим коефіцієнтом розширення (OVSF-коди). Процес проектування системи UMTS суттєво відрізняється від аналогічного процесу для системи GSM і включає такі основні етапи:

1. Конфігурування мережі: визначення розташування базових станцій на географічній мапі та налаштування їх технічних параметрів.
2. Моделювання покриття радіомережі з урахуванням рівня сигналу.
3. Планування структури суміжних стільників.
4. Моделювання покриття на основі технологій HSDPA та/або HSUPA.
5. Детальний точковий аналіз рівнів сигналу від сусідніх БС та елементів активного набору (active set), з якими взаємодіє мобільна станція (МС) у заданій точці.
6. Розподіл розширювальних послідовностей (scrambling codes) між передавачами БС. Деталізацію деяких етапів наведено нижче. Налаштування параметрів БС здійснюється через відповідні вкладки вікна властивостей базової станції — «General», «Transmitter» та «WCDMA/UMTS» (див. підрозділ 3.2) [23].

У вкладці «General» (рис. 4.1) задаються основні характеристики БС: кількість секторів (1), радіус обслуговування стільника (2), робочий частотний діапазон (3), параметри антени (4), зокрема висота її підвісу (5). У вкладці «Transmitter» (рис. 4.2) конфігуруються параметри передавача БС. Зокрема, задаються втрати в передавальному та приймальному тракці (1), які визначаються через інтерфейс «Equipment» (2) шляхом вибору відповідного обладнання (наприклад, дуплексного фільтра ТМА, типу фідера та моделі БС), а також вказується довжина фідерного тракту.

У вкладці «WCDMA/UMTS» (рис. 4.3) задаються параметри, що враховуються під час моделювання мережі UMTS. Зокрема: кількість несучих частот, що використовуються передавачем БС (1), рівні випромінюваної потужності (2) у пілотному каналі, каналі синхронізації тощо. Особливу увагу слід приділити параметру AS Threshold (3), який визначає граничне значення різниці якості пілотного сигналу між обслуговуючою БС та БС, що входять до активного набору. Додатково у цій вкладці задаються: обмеження максимальної потужності випромінювання (4), граничне значення коефіцієнта навантаження у зворотньому каналі (5), а також максимальні допустимі швидкості передавання даних на користувача у прямому (6) та зворотньому (7) каналах [23].

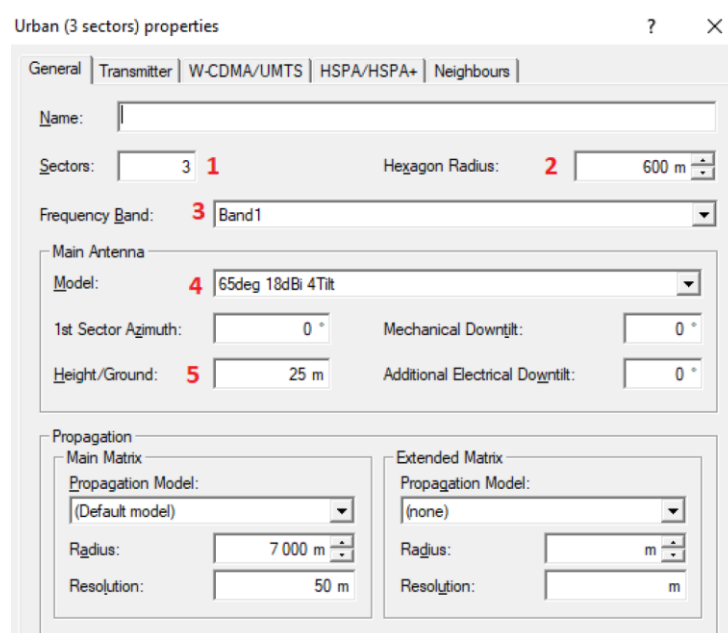


Рисунок 4.1 – Вкладка «General» вікна властивостей БС

Усі зазначені параметри враховуються при моделюванні механізмів регулювання потужності, які є критично важливими для функціонування систем на базі технології CDMA, оскільки безпосередньо впливають на пропускну здатність і ємність системи.

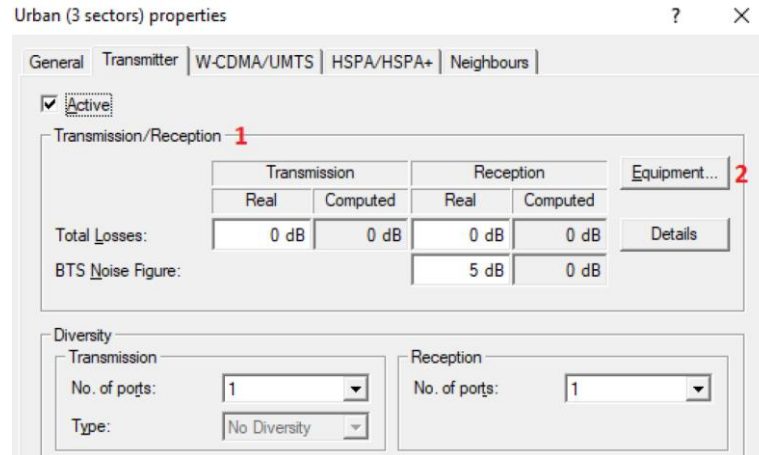


Рисунок 4.2 – Вкладка «Transmitter» вікна властивостей БС

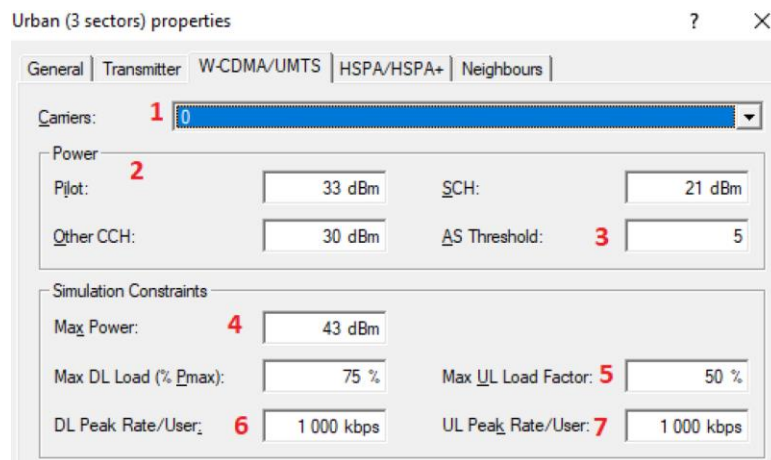


Рисунок 4.3 – Вкладка «WCDMA/UMTS» вікна властивостей БС

Моделювання радіопокриття за рівнем сигналу в системі UMTS, а також вибір відповідної моделі поширення радіохвиль, здійснюється аналогічно до методики, застосовуваної для системи GSM (див. підрозділи 3.3 та 3.4). Програмне середовище Atoll підтримує два основні типи стільників-сусідів у контексті системи UMTS:

- Внутрішньосистемні стільники-сусіди – це стільники, які функціонують у межах тієї ж самої системи (UMTS). Вони поділяються на:

- Intra-carrier neighbours – сусідні стільники, між якими реалізується хендовер на одній і тій самій несучій частоті;

- Inter-carrier neighbours – стільники, між якими хендовер здійснюється з переходом на іншу несучу частоту.

- Міжсистемні стільники-сусіди – стільники, що належать до іншої радіотехнології, відмінної від UMTS. У програмі Atoll реалізовано функціонал автоматичного планування сусідніх стільників для системи UMTS. Для виконання цієї операції необхідно викликати контекстне меню для каталогу «Transmitters», обрати послідовно пункти: Cells → Neighbours → Automatic Allocation. У вікні Automatic Neighbour Allocation доступні дві вкладки: Intra-Carrier Neighbours та Inter-Carrier Neighbours. Після налаштування відповідних параметрів планування для кожного типу внутрішньосистемних стільників, слід поетапно запустити автоматичне планування для intra-carrier та inter-carrier стільників, натиснувши кнопку Run, а після завершення процесу підтвердити результати натисканням кнопки Commit (рис. 4.4). Моделювання радіопокриття за технологіями HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) та/або HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access) здійснюється аналогічно до моделювання покриття за рівнем сигналу. Для цього в дереві проєкту необхідно натиснути правою кнопкою миші на каталозі Predictions, обрати пункт New, а потім HSDPA Coverage або HSUPA Coverage відповідно. У результаті буде сформовано графічне відображення карти покриття за показниками швидкості передавання даних у напрямках до абонента (downlink) або від абонента (uplink) (рис. 4.5). Потрібно зазначити, що зона покриття за технологіями HSDPA та HSUPA може не збігатися із зоною покриття базової системи UMTS, оскільки вони мають різні вимоги до якості сигналу та ресурсів радіоінтерфейсу [23].

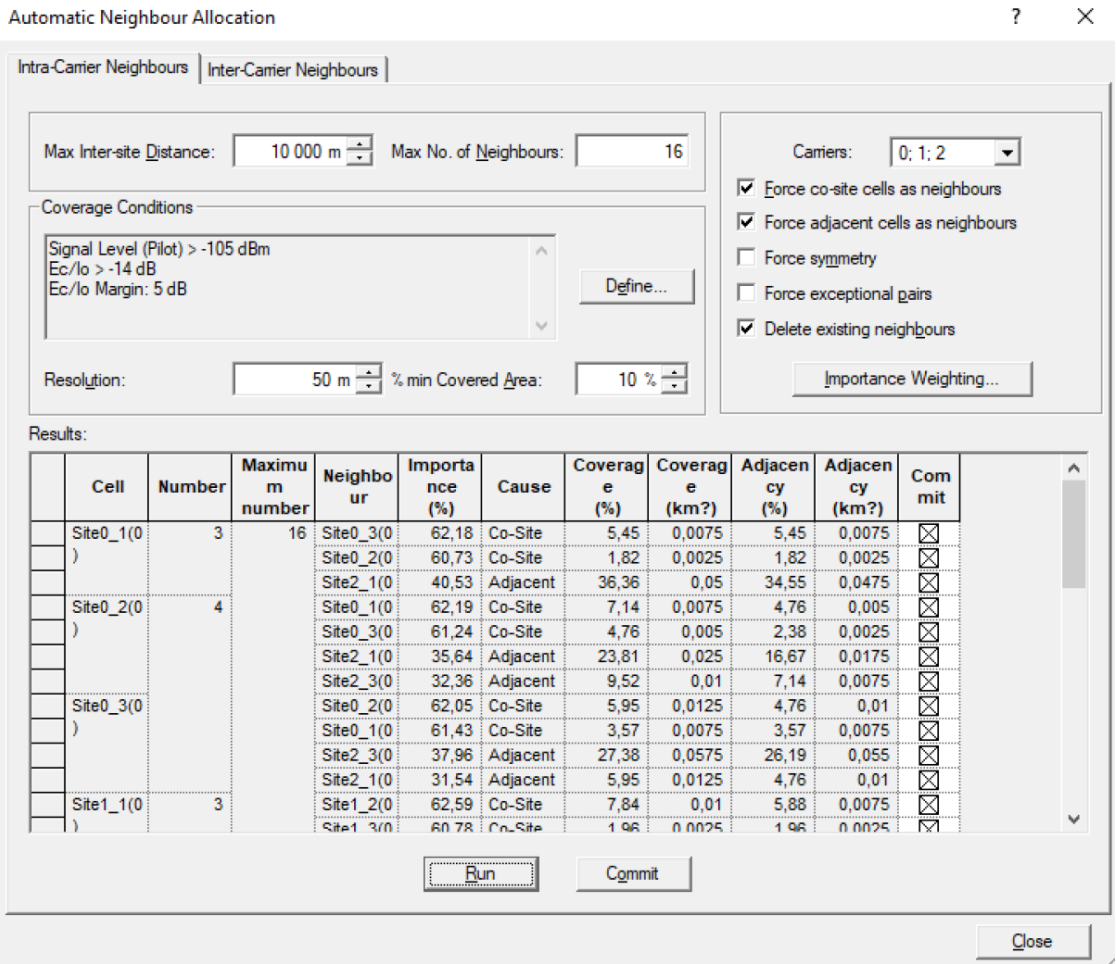


Рисунок 4.4 – Вікно результатів планування сусідніх стільників



Рисунок 4.5 – Результат моделювання покриття технологією HSDPA

Окрему аналітичну функцію виконує вкладка «SC Interference», яка дає змогу виявити потенційні завади, що можуть виникати у випадку використання однакових розширювальних кодів (scrambling codes) у передавачах різних БС, розміщених у близькому радіусі. Аналіз такого роду дозволяє своєчасно ідентифікувати джерела міжсекторальних або міжстільникових інтерференцій та оптимізувати структуру кодового планування мережі. У середовищі Atoll передбачено функціонал автоматизованого розподілення розширювальних послідовностей (scrambling codes), які використовуються для ідентифікації передавачів базових станцій у системі UMTS. Для ініціації процедури автоматичного призначення кодів необхідно викликати контекстне меню на папці «Transmitters» та послідовно обрати пункти: Cells → Primary Scrambling Codes → Automatic Allocation.

У вікні Primary Scrambling Codes, що відкриється, користувач має можливість задати параметри алгоритму розподілу та вибрати відповідну стратегію призначення кодів (наприклад, з урахуванням географічного розташування, мінімізації взаємних завад тощо). Після завершення налаштування слід натиснути кнопку Run для запуску процесу автоматичного розподілу. Результати розподілу розширювальних послідовностей потрібно підтвердити натисканням кнопки Commit (рис. 4.7), після чого призначені значення будуть застосовані до відповідних передавачів у структурі мережі.

Для візуалізації результатів розподілу розширювальних послідовностей у вигляді легенди на карті покриття необхідно викликати контекстне меню на папці «Transmitters» та обрати пункт «Properties» (рис. 4.8). У відповідному вікні можна активувати відображення атрибутивної інформації, зокрема ідентифікаторів primary scrambling codes, призначених передавачам базових станцій, що дає змогу наочно проаналізувати топологію їхнього розподілу у межах мережі [23].

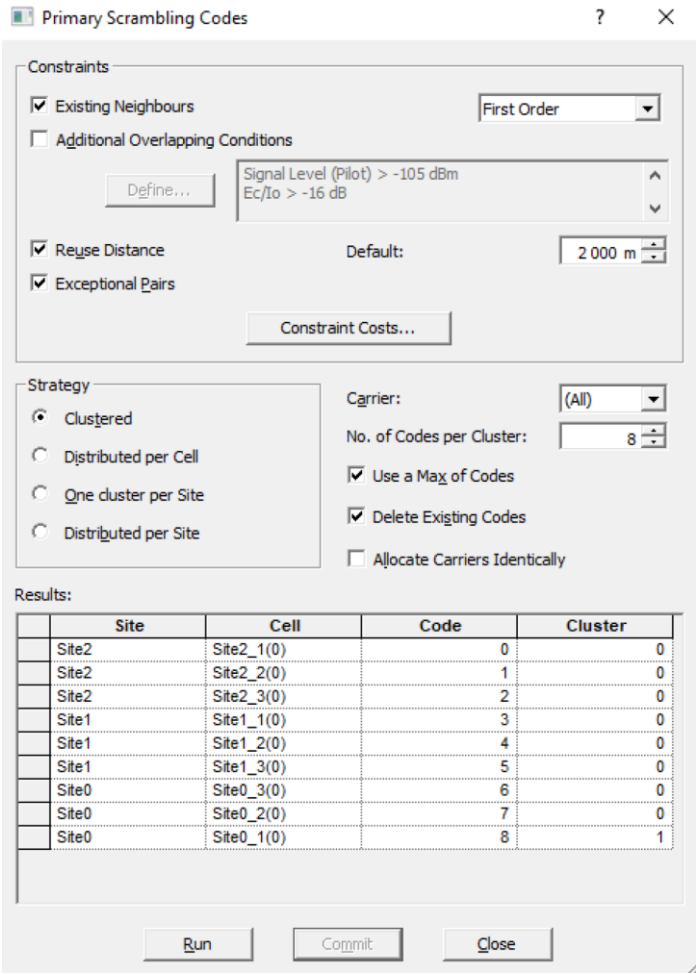


Рисунок 4.7 – Розподілення розширювальних послідовностей (scrambling codes)

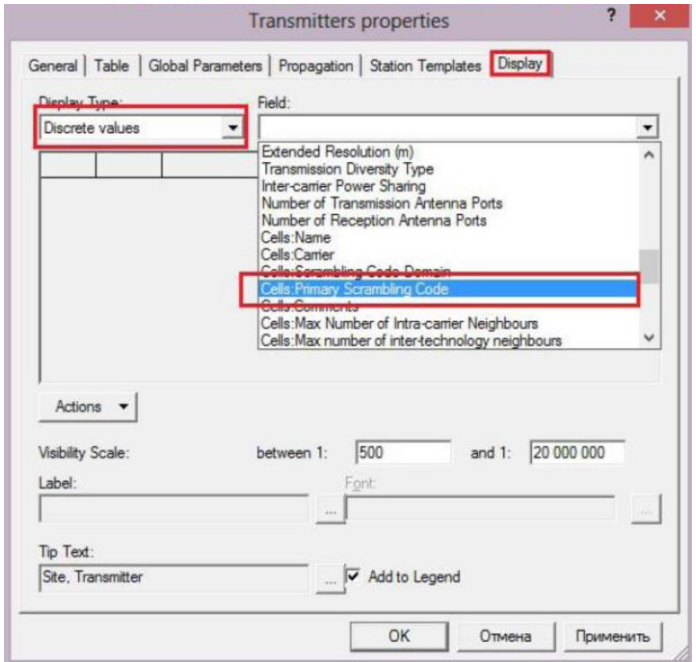


Рисунок 4.8 – Налаштування вигляду передавачів для відображення розширювальних послідовностей у вікні параметрів

4.2 Моделювання радіопокриття системи LTE на заданій території у середовищі Atoll

Система LTE (Long Term Evolution) належить до стандартів безпроводного зв'язку четвертого покоління (4G) та базується на технології широкосмугового доступу з ортогональним частотним мультимплексуванням (OFDMA) у напрямку вниз та SC-FDMA у напрямку вгору. На відміну від систем із частотно-часовим розділенням каналів (FDMA/TDMA), зокрема таких як GSM, у системі LTE передбачено можливість функціонування передавачів суміжних базових станцій на однакових частотних ресурсах, що є характерною рисою мереж з повторним використанням частот (frequency reuse factor 1).

Процес проектування та моделювання LTE-мережі має суттєві відмінності порівняно з аналогічними етапами для систем GSM та UMTS, і включає такі основні кроки:

1. Конфігурування топології мережі: розміщення базових станцій на карті місцевості та налаштування їхніх основних параметрів.
2. Моделювання радіопокриття на основі рівнів сигналу.
3. Планування структури сусідніх стільників (інтерселова взаємодія).
4. Розподіл частотного ресурсу між передавачами базових станцій.
5. Призначення фізичних ідентифікаторів стільників (Physical Cell IDs).
6. Моделювання покриття з урахуванням специфічних характеристик системи LTE: ефективного рівня сигналу (RSRP/RSRQ), пропускної здатності на лінії вниз (DL) та вгору (UL) тощо.
7. Проведення точкового аналізу якості сигналу в окремих географічних точках покриття.
8. За необхідності — оптимізація частотного плану та повторне виконання моделювання, описаного у пунктах 6 і 7.

Розглянемо окремі етапи більш детально [23].

Налаштування параметрів базових станцій здійснюється у відповідному вікні властивостей елементів мережі, що містить вкладки «General»,

«Transmitter» та «LTE» (див. підрозділ 3.2). На вкладці «General» (рис. 4.9) задаються базові параметри базової станції, зокрема: кількість секторів (1), радіус обслуговування стільника (2), параметри антенної системи: висота встановлення антени (3), модель антени, кількість антенних портів (4) тощо.

10 MHz - Dense Urban (3 sectors) properties

General | Transmitter | LTE

Name: 10 MHz - Dense Urban (3 sectors)

Sectors: 1 3 Hexagon Radius: 2 350 m

Transmitter Type: Intra-network (Server and Interferer)

Antennas

Height/Ground: 3 30 m

Main Antenna

Model: 65deg 18dBi 0Tilt 2100MHz

1st Sector Azimuth: 4 0° Mechanical Downtilt: 0°

Additional Electrical Downtilt: 0°

Number of Antenna Ports

Transmission: 1 Reception: 1

Propagation

Main Matrix

Propagation Model: (Default model)

Radius: 4 000 m

Resolution: 50 m

Extended Matrix

Propagation Model: (none)

Radius: m

Resolution: m

Рисунок 4.9 – Вкладка «General» вікна властивостей БС

На вкладці «Transmitter» (рис. 4.10) виконується налаштування параметрів передавального тракту базової станції. Зокрема, задається значення сумарних втрат у передавальному та приймальному трактах (1), що враховують втрати в антенному кабелі, фідері, а також у додатковому обладнанні (наприклад, дуплексних фільтрах, підсилювачах типу ТМА тощо). Для розрахунку цих втрат необхідно скористатися кнопкою «Equipment» (2), після чого у відповідному

вікні обрати типи використовуваних компонентів (фідер, базова станція, ТМА) та вказати довжину фідерного тракту (feeder length). Отримані значення враховуються при подальшому моделюванні радіопокриття [23].

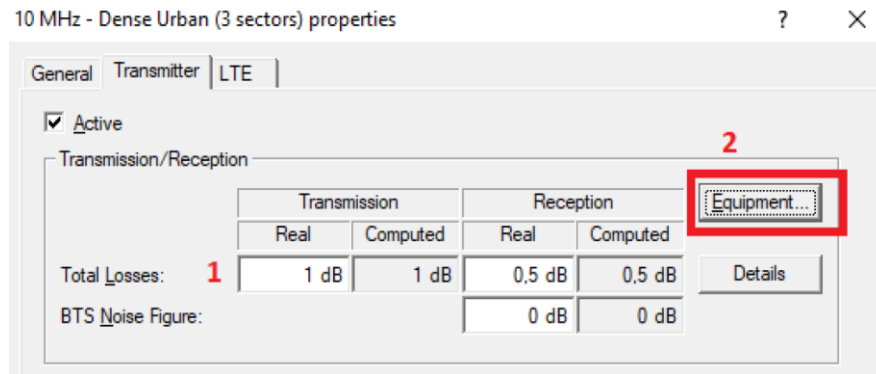


Рисунок 4.10 – Вкладка «Transmitter» вікна властивостей БС

На вкладці «LTE» (рис. 4.11) задаються параметри, що враховуються під час моделювання функціонування мережі LTE. До основних із них належать:

1. Максимальна потужність передавача базової станції, яка визначає межу енергетичних характеристик випромінювання (1).
2. Частотний діапазон (2), у межах якого працює базова станція, а також
3. Номер частотного каналу (EARFCN), що використовується конкретним передавачем (3). Параметри розподілення частот та призначення фізичних ідентифікаторів стільників (PCI) встановлюються за допомогою випадających списків «Channel Allocation Status» (4) та «Physical Cell ID Status» (5), де користувач має змогу обрати між автоматичним (not allocated) і ручним (allocated, locked) режимами налаштування. Крім того, на цій вкладці задаються характеристики конфігурації MIMO (Multiple Input Multiple Output) для передавального та приймального обладнання (6), а також параметри навантаження на лінію вниз та лінію вгору (7), що впливають на результати моделювання пропускної здатності системи.

Моделювання радіопокриття за рівнем сигналу, а також вибір моделі поширення радіохвиль здійснюються аналогічно до процедури, що застосовується для мереж GSM (див. підрозділи 3.3 та 3.4) [23].

10 MHz - Dense Urban (3 sectors) properties

General | Transmitter | **LTE**

Power and EPRE Offsets Relative to the Reference Signals

Max Power: **1** 43 dBm SCH/PBCH Offset: 0 dB
 PDSCH/PDCCH Offset: 0 dB

Frequency Band: **2** 2110 FDD - 10 MHz (E-UT) Channel Number: **3** 0
 Channel Allocation Status: **4** Not Allocated Physical Cell ID: 0
 Physical Cell ID Status: **5** Not Allocated Min Reuse Distance: m
 LTE Equipment: Default Cell Equipment
 Scheduler: Proportional Fair Max Number of Users:
 Frame Configuration: 0 - D-UUU D-UUU Reference Signal C/N Threshold: -19,5 dB

Antenna Diversity **6**

Downlink Uplink

Diversity Support: None None
 AMS/MU-MIMO dB MU-MIMO Gain: 2

Default Loads **7**

DL Traffic Load: 100 % Max DL Traffic Load: 100 %
 UL Traffic Load: 100 % Max UL Traffic Load: 100 %
 UL Noise Rise: 0 dB

Inter-technology Interferences

DL Noise Rise: 0 dB UL Noise Rise: 0 dB

Max Number of Neighbours

Intra-technology: 16 Inter-technology: 16

Рисунок 4.11 – Вкладка «LTE» вікна властивостей БС

Програмне середовище Atoll підтримує функціональність автоматичного планування сусідніх стільників для мереж LTE. Для активації цієї функції необхідно натиснути правою кнопкою миші на папці «Transmitters» та

послідовно обрати «Cells» → «Neighbours» → «Automatic Allocation». Після цього відкривається вікно «Automatic Neighbour Allocation». У цьому вікні користувач має можливість задати параметри планування, зокрема: радіус пошуку сусідніх стільників, максимально допустиму кількість сусідніх стільників для кожної комірки, умови покриття, включно з пороговими значеннями потужності сигналу, за якими визначається доцільність виконання хендвера між стільниками. Після встановлення параметрів планування виконується процес автоматичного визначення сусідів шляхом натискання кнопки «Calculate». Отримані результати фіксуються в проєкті за допомогою кнопки «Commit» (рис. 4.12) [23].

Automatic Neighbour Allocation

Automatic Neighbour Allocation

Max Inter-site Distance: 10 000 m Max No. of Neighbours: 16

Coverage Conditions

Handover start: 0 dB
Handover end: 5 dB

Define...

Resolution: 50 m % Min Covered Area: 10 %

Force co-site cells as neighbours
Force adjacent cells as neighbours
Force symmetry
Force exceptional pairs
Delete existing neighbours

Importance Weighting...

Results:

Cell	Number	Maximum number	Neighbour	Importance (%)	Cause	Coverage (%)	Coverage (km ²)	Adjacency (%)	Adjacency (km ²)	Commit
Site0_1 (0)	4	16	Site0_2 (	75,65	Co-Site	41,18	0,035	38,24	0,0325	☒
			Site0_3 (	61,18	Co-Site	2,94	0,0025	2,94	0,0025	☒
			Site2_1 (	38,47	Adjacent	32,35	0,0275	26,47	0,0225	☒
			Site1_1 (	33,97	Adjacent	23,53	0,02	8,82	0,0075	☒
Site0_2 (0)	4	16	Site0_1 (	66,36	Co-Site	21,21	0,035	13,64	0,0225	☒
			Site0_3 (	60	Co-Site					☒
			Site2_2 (	50,27	Adjacent	69,7	0,115	66,67	0,11	☒
			Site1_2 (	31	Adjacent	7,58	0,0125	1,52	0,0025	☒
Site0_3 (0)	7	7	Site0_2 (	60,57	Co-Site	1,43	0,0075	1,43	0,0075	☒
			Site0_1 (	60,06	Co-Site	0,48	0,0025			☒
			Site1_3 (	36,67	Adjacent	31,9	0,1675	18,1	0,095	☒
			Site2_3 (	34,29	Adjacent	27,62	0,145	8,57	0,045	☒
Site2_1 (	32,54	Adjacent	10,48	0,055	7,62	0,04	☒			

Calculate Commit

Close

Рисунок 4.12 – Вікно результатів планування сусідніх стільників

Розподілення частот між передавачами базових станцій (БС) у мережі LTE може здійснюватися як вручну, так і в автоматизованому режимі. Для реалізації автоматичного частотного планування необхідно викликати контекстне меню папки «Transmitters» та обрати опції «Cells» → «Frequency Plan» → «Automatic Allocation». Після цього відкривається вікно «Frequency Allocation», у якому визначаються параметри частотного плану.

Зокрема, користувач може задати:

1. Об’єкт розподілення — частоти або ідентифікатори стільників (пункт 1);
2. Умови частотного повторного використання — чи враховуються сусідні стільники, а також мінімальна допустима відстань між стільниками, які використовують однакову частоту (пункт 2). Після налаштування відповідних параметрів необхідно натиснути кнопку «Calculate», що ініціює процедуру розподілення. Отримані результати (пункт 3) закріплюються в проєкті натисканням кнопки «Commit» (рис. 4.13).

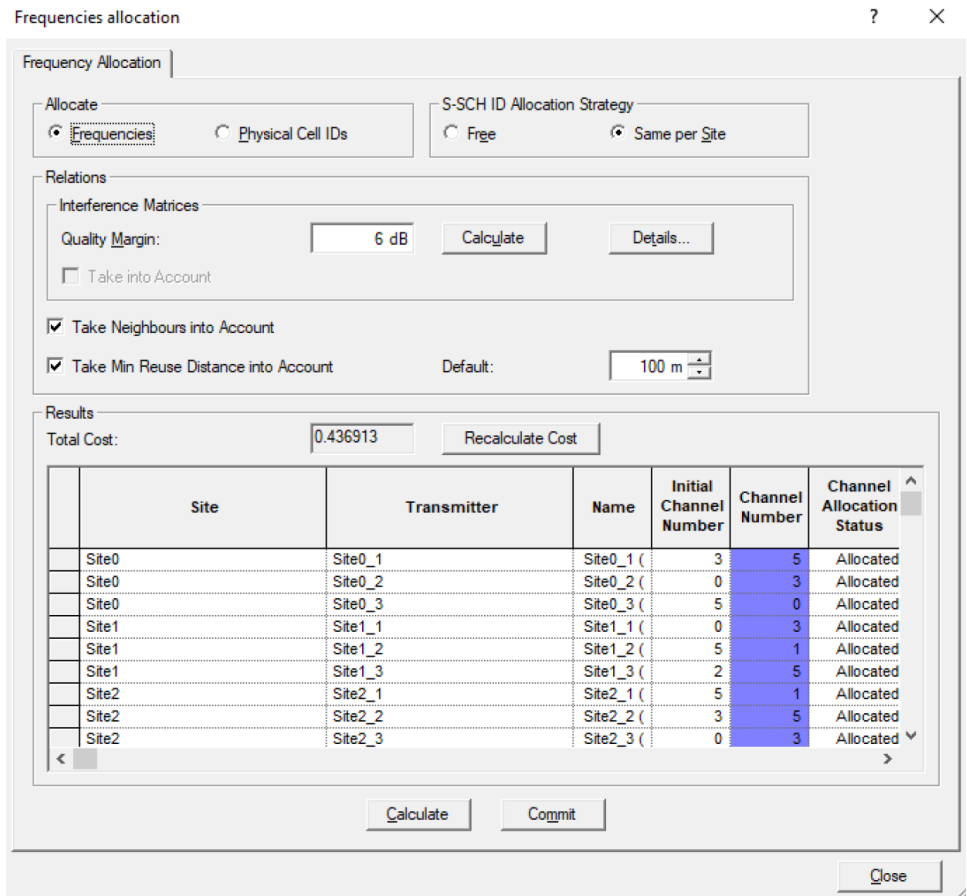


Рисунок 4.13 – Вікно результатів розподілення частот передавачів

Розподілення частот між передавачами БС у ручному режимі здійснюється індивідуально для кожного передавача. Для цього необхідно обрати відповідний передавач у структурі проєкту (папка «Transmitters») та викликати контекстне меню, обравши пункт «Properties». У вікні властивостей необхідно перейти до параметрів «Channel Number» та «Channel Allocation Status», де вказується відповідно номер частотного каналу та статус розподілення – «locked», що означає закріплення частоти за даним передавачем.

У мережах LTE використовується широкосмуговий доступ на основі технології OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Структура сигналу OFDMA включає як інформаційні підносійні для передавання корисного трафіку, так і службові сигнали, відомі як пілот-тони. Пілот-тони передаються на спеціальних підносійних та використовуються для оцінки параметрів радіоканалу, а також для ідентифікації стільника.

Пілот-тони формуються на основі псевдовипадкових послідовностей (ПВП), що жорстко пов'язані з ідентифікатором стільника (Physical Cell ID). Значення Physical Cell ID може знаходитися в межах від 0 до 503 та складається з двох компонентів: P-SCH (Primary Synchronization Signal) – 3 унікальні значення, що відповідають певному коду первинної синхронізації; S-SCH (Secondary Synchronization Signal) – 168 можливих комбінацій вторинної синхронізації.

Таким чином, ідентифікатор стільника утворюється як комбінація P-SCH та S-SCH, що забезпечує унікальність ПВП, яка передається базовою станцією. Мобільна станція виконує синхронізацію за часом і частотою, спочатку визначаючи P-SCH, а потім S-SCH, на основі яких обчислюється повний Physical Cell ID.

Автоматичний розподіл ідентифікаторів стільників здійснюється за аналогічною до частотного планування процедурою. Для цього необхідно викликати контекстне меню на папці «Transmitters» та обрати послідовність команд «Cells» → «Physical Cell IDs» → «Automatic Allocation». У вікні «Physical Cell ID Allocation» можна задати відповідні параметри розподілення, після чого

ініціювати процес, натиснувши кнопку «Calculate». Щоб застосувати отримані результати, необхідно підтвердити їх натисканням кнопки «Commit».

Моделювання радіопокриття за параметрами, специфічними для системи LTE**, виконується аналогічно до моделювання покриття за рівнем сигналу. Для ініціалізації моделювання необхідно натиснути правою кнопкою миші на папці «Predictions», обрати пункт «New», а далі – один із варіантів відповідно до задачі аналізу: «Effective Signal Analysis DL (UL)» – для оцінки ефективного рівня сигналу в напрямку вниз (Downlink) або вгору (Uplink); «Coverage by Throughput DL (UL)» – для аналізу покриття за критерієм пропускної здатності.

У результаті на карті території буде візуалізовано просторовий розподіл одного з ключових параметрів, наприклад, швидкості передавання даних у напрямку вниз або вгору (рис. 4.14) [23].

Потрібно зазначити, що оцінка зони покриття мережі LTE повинна виконуватись за ефективним рівнем сигналу (Effective Signal Level), який відображає реальну якість обслуговування користувача з урахуванням впливу інтерференції та навантаження. Моделювання за рівнем сигналу (Signal Level) доцільно застосовувати лише на початковому етапі проєктування, коли виконується попереднє розміщення базових станцій та аналіз охоплення території.

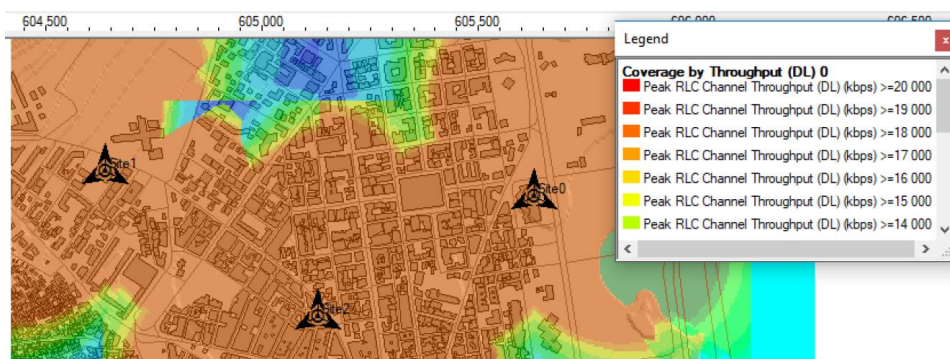


Рисунок 4.14 – Результат моделювання розподілу швидкості передавання даних у напрямку вниз

Для проведення точкового аналізу радіопокриття в програмному середовищі Atoll необхідно активувати інструмент «Point Analysis Tool» шляхом

натискання відповідної кнопки на панелі інструментів. Далі, клацнувши мишею у довільній точці на карті покриття, відкривається вікно інструмента точкового аналізу з активною вкладкою «Reception». У вкладці Reception користувач може здійснити оцінювання рівнів сигналу від усіх передавачів базових станцій (БС), присутніх у системі, а також визначити, який саме сектор БС обслуговуватиме мобільну станцію (МС) в заданій точці.

Перейшовши до вкладки «Profile», можна проаналізувати профіль радіолінії між МС та відповідним сектором БС, який виконує обслуговування.

У вкладці «Signal Analysis» подається інформація про рівні прийнятих пілот-сигналів від різних передавачів БС на обраній несучій частоті. На основі цих даних програмне забезпечення дозволяє визначити, які типи телекомунікаційних сервісів (наприклад, VoIP, відеоконференції, веб-браузинг або FTP-передавання файлів) можуть бути забезпечені в точці вимірювання з урахуванням можливостей термінального пристрою (рис. 4.15).

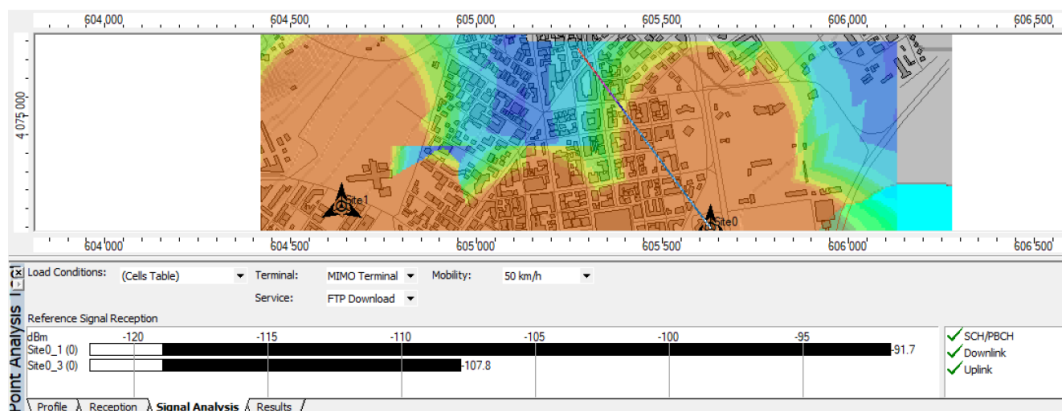


Рисунок 4.15 – Вікно «Point Analysis Tool» з вкладкою «Signal Analysis»

4.3 Висновки до розділу 4

Розглянуто процес проектування радіомереж стандартів UMTS та LTE у середовищі Atoll із використанням сучасних інструментів моделювання радіопокриття та планування ресурсів. З урахуванням проведених досліджень можна сформулювати такі висновки:

1. Виконано моделювання параметрів радіопокриття системи UMTS на заданій території з урахуванням впливу рельєфу, щільності забудови та налаштувань базових станцій. Встановлено, що найбільш істотний вплив на якість обслуговування мають висота антени, потужність передавача та вибір моделі поширення радіохвиль. За результатами моделювання отримано просторовий розподіл рівня сигналу, який дозволяє ідентифікувати зони зі зниженим рівнем покриття та оптимізувати розміщення БС.

2. Проведено моделювання покриття системи LTE, з особливою увагою до специфічних для цієї технології параметрів, зокрема ефективного рівня сигналу (Effective Signal Level), пропускної здатності (Throughput) у напрямках завантаження (DL) та вивантаження (UL), а також параметрів MIMO. Отримані результати дозволили оцінити якість сервісу в різних точках мережі, провести аналіз обслуговування абонентів на підставі потужності сигналу та розподілу пропускної здатності.

3. Досліджено особливості автоматизованого планування мереж LTE у Atoll, зокрема: планування сусідніх стільників; розподіл частотних каналів між передавачами; автоматичне призначення фізичних ідентифікаторів стільників (Physical Cell IDs); точковий аналіз радіосередовища на основі пілот-сигналів.

4. Проаналізовано функціонал інструментів «Effective Signal Analysis» та «Coverage by Throughput», які дозволяють оцінити реальну зону обслуговування користувачів на основі стандартних метрик LTE, що є більш інформативним порівняно з класичним рівнем сигналу. Отже, виконане в середовищі Atoll моделювання підтвердило, що технології UMTS та LTE можуть бути ефективно спроектовані із врахуванням географічних, технічних та сервісних факторів. Отримані результати створюють передумови для подальшої оптимізації мереж зв'язку наступного покоління.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Масштабні заходи з покращення здоров'я населення мають впроваджуватися як на загальнодержавному рівні, так і безпосередньо на кожному підприємстві та в установі згідно з чинним законодавством. Неухильне дотримання гігієнічних та фізіологічних вимог праці є відповідальністю не лише кожної окремої особи, але й будь-якого колективу – виробничого, навчального, наукового, оскільки порушення цих принципів негативно впливає як на здоров'я порушника, так і на самопочуття інших членів колективу. Гігієна та фізіологія праці є важливими інструментами для підвищення рівня охорони праці, забезпечення безпечного та здорового способу життя і професійної діяльності. Атестація робочих місць виступає одним із ключових механізмів підтримки належного рівня охорони праці, являючи собою комплексну оцінку кожного робочого місця на предмет його відповідності сучасному науково-технічному рівню виробництва, санітарно-гігієнічним нормам умов праці та психофізіологічним характеристикам працівника. Це дозволяє не лише ефективно виконувати професійні обов'язки, але й зберігати здоров'я та працездатність протягом тривалого часу, сприяючи професійному довголіттю.

Дослідження на тему «Метод автоматизованого планування базових станцій мобільних телекомунікаційних мереж» відбувалося в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На дослідника, відповідно до Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», можуть мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори: підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; недостатнє освітлення робочої зони; недостатність природного освітлення; підвищений рівень шуму на робочому місці; відсутність чи нестача природнього світла; фізичні перевантаження (статичні); нервово - психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів, емоційні навантаження).

Відповідно до визначених факторів формуємо рекомендації щодо безпечних умов праці під час виконання роботи.

5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

5.1.1 Обладнання робочого місця

Ефективність та безпека будь-якого робочого процесу значною мірою визначаються обладнанням робочого місця. Ретельно сплановане та ергономічно організоване робоче середовище не лише сприяє підвищенню продуктивності праці, але й відіграє ключову роль у збереженні здоров'я працівників та запобіганні виробничому травматизму. У сучасному світі, де технології стрімко розвиваються, питання вибору, розміщення та обслуговування обладнання робочого місця набуває особливої актуальності. Від правильно підібраних інструментів та пристроїв до оптимального розташування меблів та забезпечення сприятливих умов праці – кожен елемент обладнання впливає на якість виконуваної роботи, самопочуття працівника та загальну ефективність діяльності підприємства чи установи.

Робочий стіл для ПК, як правило, має бути обладнаним підставкою для ніг шириною не менше 300 мм та глибиною не менше 400 мм, з можливістю регулювання по висоті в межах 150 мм та кута нахилу опорної поверхні – в межах 20 град. Підставка повинна мати рифлену поверхню та бортик на передньому краї заввишки 10 мм. Застосування підставки для ніг тими, у кого ноги не дістають до підлоги, є обов'язковим. Рекомендовані розміри столу: висота – 725 мм, ширина – 600 -1400 мм, глибина – 800 – 1000 мм. Робочий стіл для ПК повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше 500 мм, глибиною на рівні колін не менше 450 мм, на рівні витягнутої ноги – не менше 650 мм. Робоче сидіння (крісло) користувача ПК повинно мати такі основні елементи: сидіння, спинку, стаціонарні або знімні підлокітники.

У конструкцію сидіння можуть бути введені додаткові елементи, що не є обов'язковими: підголовник та підставка для ніг. Робоче сидіння користувача ПК

повинно бути підйомно-поворотним, таким, що регулюється за висотою, кутом нахилу сидіння та спинки, за відстанню спинки до переднього краю сидіння, висотою підлокітників. Регулювання кожного параметра має бути незалежним, плавним або ступінчатим, мати надійну фіксацію.

Хід ступінчатого регулювання елементів сидіння має становити для лінійних розмірів 15 – 20 мм, для кутових – 2 – 5 град. Зусилля під час регулювання не повинні перевищувати 20 Н. Ширина та глибина сидіння повинні бути не меншими за 400 мм. Висота поверхні сидіння має регулюватися в межах 400 – 500 мм, а кут нахилу поверхні – від 15 град. вперед до 5 град. назад. Поверхня сидіння має бути плоскою, передній край – заокругленим. Висота спинки сидіння має становити 300+ -20 мм, ширина – не менше 380 мм, радіус кривизни в горизонтальній площині – 400 мм. Кут нахилу спинки повинен регулюватися в межах 0 – 30 град. відносно вертикального положення. Відстань від спинки до переднього краю сидіння повинна регулюватись у межах 260 – 400 мм.

Для зниження статичного напруження м'язів рук необхідно застосовувати стаціонарні або знімні підлокітники довжиною не менше 250 мм, шириною – 50 – 70 мм, що регулюються по висоті над сидінням у межах 230+ -30 мм та по відстані між підлокітниками в межах 350 – 500 мм.

Поверхня сидіння, спинки та підлокітників має бути напівм'якою, з неслизьким, повітронепроникним покриттям та забезпечувати можливість чищення від бруду. Монітор та клавіатура мають розташовуватися на оптимальній відстані від очей користувача, але не ближче 600 мм, з урахуванням розміру алфавітно-цифрових знаків та символів (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Норми відстані від екрана до ока працівника

При розмірі екрану по діагоналі	Відстань від екрана до ока працівника
35/38 см (14"/15")	600 – 700 мм
43 см (17")	700 – 800 мм
48 см (19")	800 – 900 мм
53 см (21")	900 – 1000 мм

Розташування монітору має забезпечувати зручність зорового спостереження у вертикальній площині під кутом ± 30 град. від лінії зору працівника.

Клавіатуру слід розміщувати на поверхні столу або на спеціальній, регульованій за висотою, робочій поверхні окремо від столу на відстані 100 – 300 мм від краю, ближчого до працівника. Кут нахилу клавіатури має бути в межах 5 – 15 град. Розміщення принтера або іншого пристрою введення-виведення інформації на робочому місці має забезпечувати добру видимість монітору, зручність ручного керування пристроєм введення-виведення інформації в зоні досяжності моторного поля: по висоті 900 – 1300 мм, по глибині 400 – 500 мм.

При потребі високої концентрації уваги під час виконання робіт з високим рівнем напруженості суміжні робочі місця з ПК необхідно відділяти одне від одного перегородками висотою 1,5 – 2 м.

Вимоги безпеки під час виконання роботи:

- необхідно стійко розташовувати клавіатуру на робочому столі, не опускати її хитання. Під час роботи на клавіатурі сидіти прямо, не напружуватися;

- для уникнення несприятливого впливу на користувача пристроїв типу «миша» належить забезпечувати вільну велику поверхню столу для переміщення миші і зручного упору ліктьового суглоба;

- не дозволяються сторонні розмови, подразнюючі шуми;

- періодично при вимкненому комп'ютері прибирати ледь змоченою мильним розчином бавовняною ганчіркою порох з поверхонь апаратури. Екран ВДТ та захисний екран протирають ганчіркою, змоченою у спирті. Не дозволяється використовувати рідинні або аерозольні засоби чищення поверхонь комп'ютера.

Забороняється:

- класти будь-яку предмети на апаратуру комп'ютера;

- закривати будь-чим вентиляційні отвори апаратури, що може призвести до її перегрівання і виходу з ладу.

Для зняття статичної електрики рекомендується час від часу доторкатися до металевих поверхонь.

5.1.2 Електробезпека

У виробничому приміщенні експлуатуються чотири комп'ютери, під'єднані до електромережі з напругою 220 В. Відповідно до класифікації електробезпеки, встановленої НПАОП 40.1-1.32-01, це приміщення належить до категорії з відсутністю підвищеної небезпеки ураження електричним струмом для працівників. Проте, навіть у таких умовах, є необхідність у суворому дотриманні основних правил електробезпеки, зокрема візуальної перевірки цілісності ізоляції кабелів та належного функціонування заземлення обладнання. Обов'язковим превентивним заходом для запобігання електротравмам є систематичне проведення інструктажів з електробезпеки для всього персоналу. До того ж, слід забезпечити наявність первинних засобів пожежогасіння, оскільки несправності в електрообладнанні можуть спровокувати пожежу.

З метою запобігання електротравматизму в приміщенні передбачені такі заходи:

1. Струмопровідні частини електрообладнання ізолюються згідно з вимогами чинних нормативних документів.

2. Забезпечується захисне заземлення з використанням природних заземлювачів.

3. Систематично проводяться інструктажі з електробезпеки для працівників.

4. На робочих місцях неухильно дотримуються правил електробезпеки.

Перед тим, як приступити до виконання робочих обов'язків, слід вжити низку запобіжних заходів для гарантування безпечних і комфортних умов праці: запустити систему кондиціонування повітря в робочому приміщенні для підтримання оптимальних показників мікроклімату; візуально перевірити стійкість та надійність розташування обладнання на робочій поверхні; уважно оглянути загальний технічний стан апаратури, електропроводки, з'єднувальних

кабелів, штепсельних роз'ємів, розеток та інших компонентів; відрегулювати рівень освітлення робочої зони відповідно до індивідуальних потреб для забезпечення належної видимості та зменшення навантаження на очі.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Незважаючи на те, що параметри мікроклімату виробничих приміщень можуть змінюватись, іноді навіть значно, температура тіла людини залишається сталою (36,6 °C). Це досягається завдяки терморегуляції – властивості організму людини підтримувати тепловий баланс із навколишнім середовищем. Нормальний перебіг фізіологічних процесів, а отже, і хороше самопочуття можливе лише тоді, коли тепло, що виділяється організмом людини, постійно відводиться в навколишнє середовище. Мікрокліматичні умови, які забезпечують цей процес, вважаються найкращими. У разі незадовільних мікрокліматичних умов у організмі людини для підтримання сталої температури тіла починають відбуватися різні процеси, спрямовані на регулювання теплоутворення і тепловіддачі.

За енерговитратами робота дослідника відноситься до категорії I а. Нормовані значення параметрів мікроклімату для цієї категорії наведені в табл. 5.2 (відповідно до ДСН 3.3.6.042-99)

Таблиця 5.2 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату здійснюються такі заходи:

Температура в приміщенні в холодний період року підтримується за допомогою системи центрального опалення.

Для забезпечення нормованих значень руху кисню передбачається припливна вентиляційна система.

Здійснюється систематичне вологе прибирання.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

Основними джерелами запилення повітря в приміщенні є одяг людей та пил, що потрапляє ззовні. Значного виділення шкідливих газів не спостерігається, проте відзначається підвищений рівень озону, зумовлений інтенсивною експлуатацією копіювальної техніки. Гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин, виявлених у досліджуваному приміщенні, представлені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	4

Після всього п'яти хвилин роботи з відеодисплейним терміналом (ВДТ) кількість легких негативних іонів у повітрі зменшується приблизно увосьмеро, а через три години їх концентрація сягає нульової позначки. Водночас спостерігається зростання концентрації позитивних іонів, і вже через три години роботи з ВДТ у повітрі робочої зони починають домінувати позитивно заряджені частинки різного розміру. Подібна зміна балансу іонного складу повітря чинить негативний вплив на самопочуття та здоров'я користувачів ВДТ. Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Для забезпечення складу повітря робочої зони використовують механічну вентиляцією та здійснюють регулярне прибирання. За необхідності – провітрювання через відчинені вікна та двері.

5.2.3 Виробниче освітлення

Найоптимальнішим під час оператора ПК є природне освітлення, однак використання одного природного світла для промислових будівель є недостатнім через недосконалість застосовуваних світлопрозорих конструкцій і незадовільну їх експлуатацію. Штучне освітлення приміщення здійснюється штучними джерелами світла. Упровадження нових технологічних процесів, які потребують напруження зору, подальший розвиток компактності забудови, масове застосування блоків промислових споруд неминуче пов'язане з посиленням ролі штучного освітлення, що доповнює недостатнє природне освітлення у віддалених від світлопрорізів зонах приміщення.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 5.5:

Для забезпечення достатнього освітлення слід максимально використовувати бічне природного освітлення, систематично очищувати скло від бруду та систематично замінювати перегорілі лампи.

Таблиця 5.5 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрияд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

5.2.4 Виробничий шум

Джерелами шуму під час проведення дослідження є працююча техніка та транспорт, який рухається ззовні приміщення. Згідно ДСН 3.3.6.037-99 характеристикою постійного шуму на робочих місцях є середньоквадратичні рівні тисків в октавних смугах частот з середнегеометрическими стандартними частотами: 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 і 8000 Гц. У цьому документі вказані значення гранично допустимих рівнів шуму на робочих місцях підприємств (табл. 5.6).

Таблиця 5.6 - Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середнегеометричними частотами, Гц									
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Постійні робочі місця в промислових	107	95	87	82	78	75	73	71	69	

Для зниження шуму в приміщенні необхідно застосовувати мало шумові вентилятори та встановити метало пластикові вікна, які мають добру звукоізоляцію.

5.2.5 Виробничі випромінювання

Ступінь впливу електромагнітних випромінювань на організм працівника залежить від діапазону частот, тривалості опромінення, характеру опромінення, режиму опромінення, розмірів поверхні тіла, яке опромінюється, та індивідуальних особливостей організму. Електромагнітні випромінювання, на робочому місці дослідника, мають широкий діапазон частот. Відповідно до стандартів, електромагнітне випромінювання повинне бути виміряне в діапазоні частот від 5 Гц до 400 кГц. Гранично допустимі рівні електромагнітного поля для працівника становлять $E_{гдр} = 25 \text{ В/м}$ та $B_{гдр} = 250 \text{ нТл}$.

Для обмеження впливу ЕМП на працівника слід використовувати лише якісну техніку із сертифікатом якості і дотримуватися встановленого часу роботи за ПК.

5.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку забезпечують системи запобігання пожежі та протипожежного захисту, а також організаційно-технічні заходи. Управління пожежною безпекою передбачає підвищення безпечності стану приміщень, обладнання та виробничих процесів.

Досліджуване приміщення відноситься до категорії пожежної безпеки Г (горючі і важкогорючі рідини, тверді горючі і важкогорючі речовини й матеріали (у тому числі пил та волокна), речовини й матеріали при взаємодії з водою, киснем повітря або одне з одним здатні горіти).

Відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 будівлі, де розміщено приміщення, відноситься до II – го ступеня вогнестійкості (будівля з несучою конструкцією з

природних матеріалів або штучного каменю, бетону або залізобетону з застосуванням листових і плиткових негорючих матеріалів).

5.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Система пожежної безпеки – це комплекс організаційних заходів і технічних засобів, спрямованих на запобігання пожежі та збиткам від неї.

Пожежобезпека об'єкта – стан об'єкта, за якого з регламентованою ймовірністю виключається можливість виникнення й розвитку пожежі та впливу на людей небезпечних факторів пожежі, а також забезпечується захист матеріальних цінностей.

До причин, що можуть спричинити пожежу в приміщенні, відносяться: короткі замикання; перевантаження електромережі і перегріву струму несучих частин та з'єднань; порушення правил експлуатації офісної техніки.

Для запобігання пожежі здійснюють такі заходи:

- вчасно виявляти й усувати несправності електрообладнання, проводити плановий огляд і своєчасно усувати всі несправності;
- заборона використання несправних електроприладів;
- заборонити куріння в невістановлених для цього місцях;
- систематично проводити протипожежний інструктаж, на якому ознайомити працівників з правилами протипожежної безпеки, а також навчити використанню первинних засобів пожежогасіння.

5.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Пожежну безпеку забезпечують такі основні складові:

- технічна система, яка передбачає надійність обладнання, використання безпечних технологій, визначає обсяг вибухопожежонебезпечних речовин, проектні рішення, впровадження систем виявлення та гасіння пожеж, розміщення обладнання тощо;
- персонал, його підготовка, забезпечення регламентами та правилами роботи;

- система управління.

Для подачі сигналів про пожежу у приміщенні встановлено пожежну сигналізацію. На видних місцях розміщені таблички із зазначенням номеру телефону для виклику пожежної охорони та правилами пожежної безпеки.

Проходи до зовнішніх стаціонарних пожежних драбин, пожежного інвентарю, обладнання та засобів пожежогасіння мають бути завжди вільними, утримуватися справними. Евакуаційні шляхи і виходи повинні утримуватися вільними, нічим не зашарашуватися і в разі виникнення пожежі забезпечувати безпеку під час евакуації всіх людей, які перебувають у приміщенні. Евакуація повинна здійснюватися за встановленим планом, щоб уникнути заторів.

Після закінчення роботи від усіх електроприладів, а також з мереж їх живлення повинна бути відключена напруга (за винятком протипожежних та охоронних установок). Електропроводи для підключення комп'ютерів, приладів повинні прокладені по негорючих конструктивних елементах.

Згідно норм НАПБ Б.01.008-2018 на кожні 20 м² площі приміщення вказаних категорії та класу пожежовибухонебезпеки та можливих класів пожеж – А і Е розміщується один порошковий або вуглекислотний вогнегасник з масою заряду від 3 до 5 кг. Крім того на поверсі, де знаходиться приміщення слід забезпечити наявність двох порошкових вогнегасники з масою заряду 10 кг.

В цілому приміщення по категорії вибухо- і пожежонебезпечності та ступеню вогнестійкості відповідає нормам.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено, розроблено та частково реалізовано метод автоматизованого планування базових станцій (БС) мобільних телекомунікаційних систем, зокрема транкінгових систем зв'язку (ТСЗ), що має теоретичне та практичне значення для автоматизації процесу проєктування систем мобільного радіозв'язку. У результаті виконання роботи отримано наступні висновки:

1. Проведено порівняльний аналіз сучасного програмно-методичного забезпечення, яке застосовується при проєктуванні ТСЗ, зокрема з використанням середовища Atoll, що дало змогу оцінити переваги й обмеження різних підходів до моделювання зон покриття.

2. Проаналізовано існуючі методики розрахунку радіопокриття та алгоритми просторового розміщення БС, що дало підстави для формулювання критеріїв ефективного планування мережі.

3. На основі моделі COST231-Hata сформульовано математичну модель зон покриття, що враховує основні параметри середовища поширення радіохвиль у міській забудові.

4. Розроблено алгоритм обчислення зон покриття БС, реалізований у середовищі програмування з використанням адаптованої моделі COST231-Hata, що забезпечує гнучке врахування висоти антен, потужності передавачів і характеристик місцевості.

5. Запропоновано метод автоматизованого розміщення БС, який базується на ітеративному уточненні зон покриття та виборі оптимального розташування передавачів з метою забезпечення цільової території якісним сигналом при мінімальній кількості БС.

6. Розроблено структуру програмного модуля, який реалізує зазначений метод і забезпечує розрахунок зон покриття, автоматичний вибір місць встановлення БС, а також оцінку ефективності покриття.

7. Сформульовано методику автоматизованого проєктування транкінгових систем зв'язку, яка дозволяє зменшити трудомісткість проєктування, підвищити точність оцінювання зони обслуговування та оптимізувати кількість БС, необхідних для повноцінного покриття заданої території.

8. Практичну ефективність запропонованого методу підтверджено при моделюванні систем GSM, UMTS та LTE у програмному середовищі Atoll, що дозволило виявити особливості проєктування систем різних поколінь, зокрема особливості частотного планування, вибору фізичних ідентифікаторів стільників та оцінювання пропускної здатності.

Отримані результати можуть бути використані при подальшому вдосконаленні автоматизованих систем проєктування мобільних телекомунікаційних мереж, а також у навчальному процесі під час вивчення дисциплін, пов'язаних з проєктуванням та оптимізацією систем безпроводового зв'язку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sladan M. Svrzic. 25 years of the tetra standard and technology for contemporary digital trunking systems of professional mobile radio communications// Vojnotehnički glasnik / Military technical courier, 2021, vol. 69, issue 2.pp. 426-450.
2. ETSI, “Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D),” ETSI EN 300 392-2 V3.3.1, 2019.
3. ETSI, “Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 4: Collection of Data,” ETSI EN 302 637-4 V1.3.1, 2019.
4. TCCA, “TETRA - the Future,” [Online]. Available: <https://tcca.info/tetra/tetra-in-future/>.
5. Airbus Critical Communications, “Succeed in TETRA to 4G/5G Broadband Migration,” [Online]. Available: <https://criticalcommunications.airbus.com/en/newsroom/web-story/tetra-to-4g-5g-broadband-migration-14-ways-to-ensure-success>.
6. A. M. Titov, “Information technology and telecommunications: modernization of critical communication systems based on TETRA and its integration with 4G/5G networks,” PhD dissertation, National Technical University of Ukraine, 2022.
7. J. Smith, “Hybrid Networks: Bridging TETRA and LTE,” Journal of Critical Communications, vol. 12, no. 3, pp. 45-56, 2021.
8. R. Brown, “Next-Generation Public Safety Networks,” IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 7, pp. 22-29, 2020.
9. K. Lee, “Integration Challenges of TETRA and 5G Networks,” Proceedings of the International Conference on Telecommunications, pp. 123-130, 2021.
10. S. Patel, “Broadband Solutions for Critical Communications,” Critical Communications World, 2020.

11. M. Ivanov, "Digital Transformation in Public Safety Communications," *Telecommunications Review*, vol. 15, no. 4, pp. 78-85, 2022.
12. ETSI, "Guidelines for Migration to Broadband Networks," ETSI TR 103 456 V1.1.1, 2020.
13. TCCA, "Critical Communications Evolution," [Online]. Available: <https://tcca.info/critical-communications-evolution/>.
14. Airbus Critical Communications, "Hybrid Network Implementation Strategies," [Online]. Available: <https://criticalcommunications.airbus.com/en/newsroom/hybrid-network-implementation-strategies>.
15. J. Doe, "Public Safety Communications: A Comparative Study," PhD dissertation, University of Cambridge, 2021.
16. P. Wang, "5G Integration in Legacy Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 2, pp. 345-356, 2021.
17. L. Zhang, "Optimizing TETRA for Next-Generation Networks," *International Journal of Telecommunications*, vol. 18, no. 1, pp. 12-20, 2020.
18. H. Kim, "Critical Communications in the Era of 5G," *Proceedings of the Global Communications Conference*, pp. 89-96, 2021.
19. F. Gonzalez, "TETRA and LTE: A Comparative Analysis," *Journal of Wireless Communications*, vol. 10, no. 2, pp. 34-42, 2020.
20. ETSI, "Technical Specifications for Broadband Integration," ETSI TS 102 726 V1.2.1, 2021.
21. TCCA, "Future Trends in Critical Communications," [Online]. Available: <https://tcca.info/future-trends-in-critical-communications/>.
22. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із дисципліни «Системи мобільного зв'язку» Частина 1 / укладач: В. В. Гриненко, О.В. Д'яченко. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 35 с.
23. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із дисципліни «Системи мобільного зв'язку» Частина 2 / укладач: В. В. Гриненко, О.В. Д'яченко. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 66 с.

24. ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення». https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2
25. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України від 08 квітня 2014 року № 248.
26. Директива № 90/270/ЄЕС «Про мінімум вимог безпеки і гігієни праці при роботі з екранними пристроями. Режим доступу: <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/provisions-on-workload-ergonomical-and-psychosocial-risks/osh-directives/5>
27. ДСан ПіН 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ. Режим доступу: <http://document.ua/derz-nor4881.html>
28. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>
29. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Режим доступу до сторінки: http://hrliga.com/index.php?module=norm_base&op=view&id=819
30. ДСНіПЗ.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>.
31. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028.
32. ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004.

33. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=77160
34. НПАОП 40.1-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.
35. СанПіН 2.2.4.1294-03 «Фізичні фактори виробничого середовища. Гігієнічні вимоги до аероіонного складу повітря виробничих і громадських приміщень». Режим доступу: <http://www.ionization.ru/issue/iss5.htm>
36. НАПБ Б.01.008-2018 Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників - [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82176
37. НАПБ А.01.001-14 Правила пожежної безпеки в Україні [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z1410-04>
38. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО ПЛАНУВАННЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ
МОБІЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

назва бакалаврської кваліфікаційної роботи

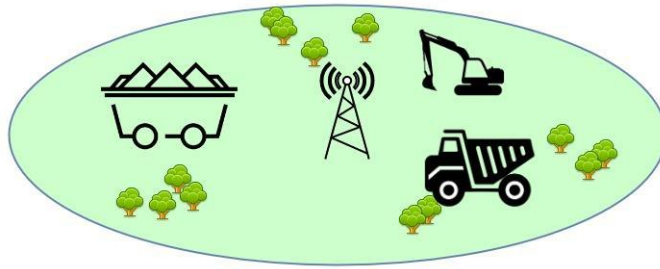


Рисунок 1 – Однозонова транкінгова система зв'язку

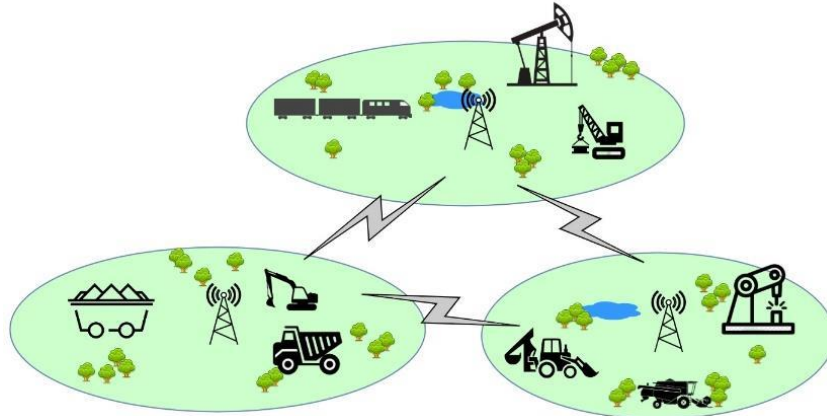


Рисунок 2 – Багатозонова транкінгова система зв'язку

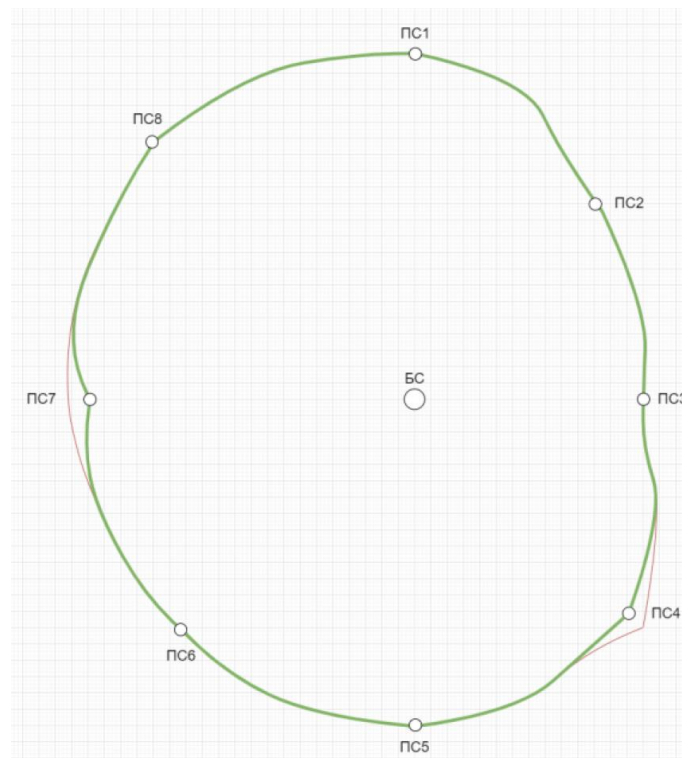


Рисунок 3 – Зона покриття за модифікованою моделлю COST231-Hata

Таблиця 3.1 — Моделі поширення радіохвиль, реалізовані в Atoll

Модель ПРХ	Частотний діапазон	Дані, що беруться до уваги	Рекомендоване застосування
LongLey- Rice (теоретична)	~ 40 МГц	- Профіль місцевості	- Рівнинні області -Дуже низькі частоти
ITU 370-7 Vienna 93	100-400 МГц	- Профіль місцевості	-Значні відстані {d > 10 км) -Низькі частоти
ГШ 1546	30 - 3000 МГц	- Профіль місцевості	1 < d< 1000 км >Радіомовлення >Наземні та морські рухомі служок
Пи 526-5 (теоретична)	30-10000 МГц	- Профіль місцевості	- Фіксовані приймачі
WLL	30-10000 МГц	5) Профіль місцевості 6) Дифракція - детерміновані перешкоди	- Фіксовані приймачі: >Мікрохвильові лінії >WiMAX
Okumura - Hata	150 -1000 МГц	- Профіль місцевості - Дифракція - статистичні перешкоди (на стороні приймача)	1 <d< 20 км >GSM 900 > CDMA2000 >LTE
Coct-Hata	1500 - 2000 МГц	-Профіль місцевості -Дифракція - статистичні перешкоди (на стороні приймача)	1 <d< 20 км > GSM 1800 >UiiiS >LTE
ITU 529-3	300-1500 МГц	-Профіль місцевості -Дифракція - статистичні перешкоди (на стороні приймача)	1 <d< 100 KM >GSM 900 >CDMA2000 >LTE
Standard Propagation Model	150-3500 МГц	7) Профіль місцевості 8) Дифракція - статистичні перешкоди	l<d - 20 км O- GSM900 >GSM 1800 >UNITS >CDMA2000 >WiMAX >LTE (доступне автоматичне калібрування моделі)
Erceg- Greenotein (SUD	1900 - 6000 МГц	- Профіль місцевості - Дифракція - статистичні перешкоди (на стороні приймача)	- Міські і приміські області, 100 м d< S км > Фіксовані WiMAX
Sakagami Extended	3000 - 6000 МГц	-Профіль місцевості -Дифракція - статистичні перешкоди	1 <d< 20 км о WiMAX (доступне автоматичне калібрування моделі)

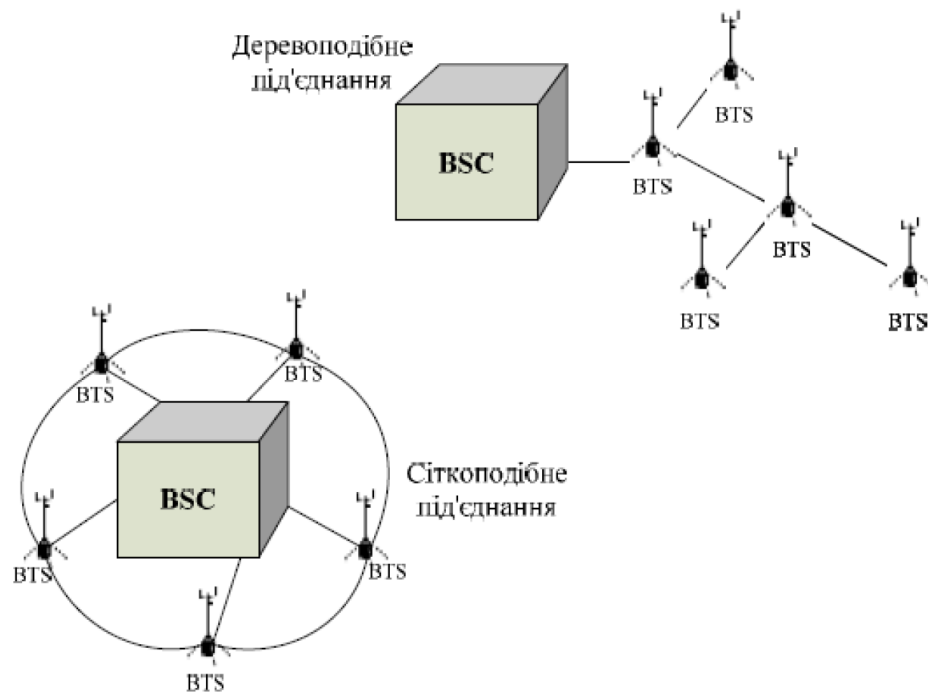


Рисунок 4 – Схеми під'єднання базових станцій до контролера BSC

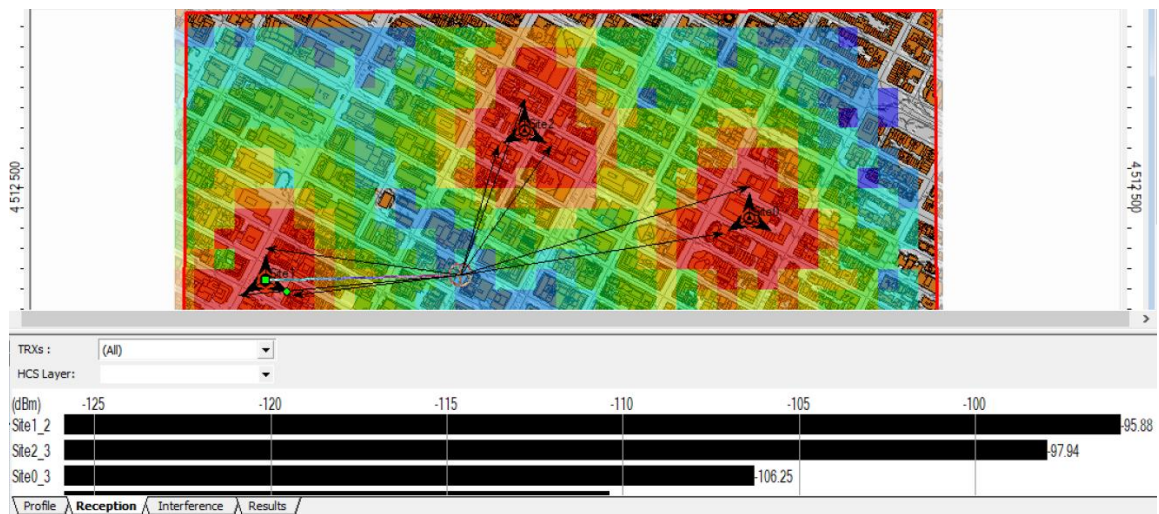


Рисунок 5 – Режим точкового аналізу

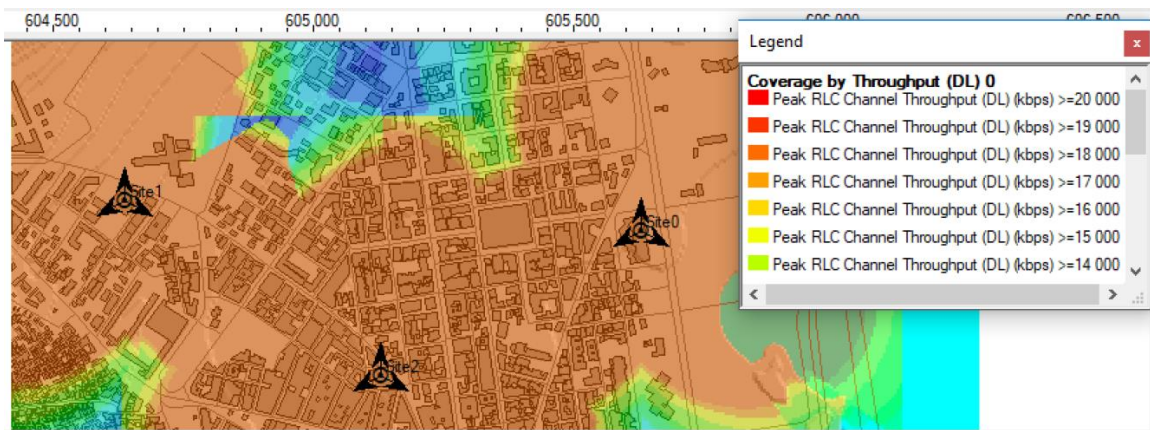


Рисунок 6 – Результат моделювання розподілу швидкості передавання даних у напрямку вниз

Додаток Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Метод автоматизованого планування базових станцій мобільних телекомунікаційних систем

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС, група ПЗТ-23мсз
(кафедра, факультет, навчальна група)

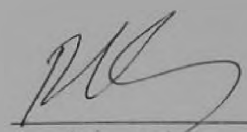
Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 10.22 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

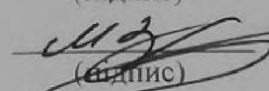
- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

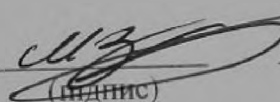
Кичак В.М., завідувач кафедри ІКСТ
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

Васильківський М.В., гарант ОПП
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

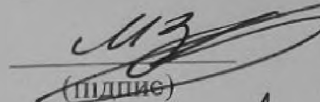
Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

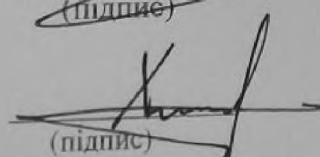
З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник


(підпис)

Васильківський М.В., доцент кафедри ІКСТ
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач


(підпис)

Хринівський Д.О.
(прізвище, ініціали)