

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут електроенергетики
Факультет інформаційних технологій
Кафедра безпеки інформації та телекомунікацій

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня магістра

студента Кондратьєвої Юлії Андріївни

академічної групи 172М-21-1

спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою Телекомунікації та радіотехніка

на тему «Дослідження параметрів стільникових мереж

стандарту GSM-1800 для рівномірно

забудованого міського району на основі декількох моделей»

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	к.ф.-м.н. доц. Горєв В. М.			
розділів:				
спеціальний	к.ф.-м.н. доц. Горєв В. М			
економічний	к.е.н., доц. Романюк Н.М.			

Рецензент				
-----------	--	--	--	--

Нормоконтролер	к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю.			
----------------	-----------------------------	--	--	--

Дніпро
2022

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
безпеки інформації та телекомунікацій
д.т.н., професор _____ Корнієнко В.І.
« ____ » _____ 2022 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу ступеня магістра

студенту _____ *Кондратьєва Ю. А.* _____ академічної групи _____ *172М-21-1* _____
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності _____ *172 Телекомунікації та радіотехніка* _____

спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою _____ *Телекомунікації та радіотехніка* _____

на тему _____ *«Дослідження стільникових мереж стандарту GSM-1800*
для рівномірно забудованого міського району на основі декількох моделей» _____

Затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від _____ № _____

Розділ	Зміст	Термін виконання
Стан питання. Постановка задачі	Аналітичний огляд літератури по темі проекту	Вересень 2022
Спеціальна частина	Принцип роботи систем передачі даних на базі використання системи мобільного зв'язку стандарту IEEE 802.11. Розробка моделі в середовищі MATLAB. Оформлення пояснювальної записки.	Жовтень 2022
Економічний розділ	Розрахунок капітальних витрат	Листопад 2022

Завдання видано _____
(підпис керівника)

Горєв В. М.
(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: _____

Дата подання до екзаменаційної комісії: _____

Прийнято до виконання _____
(підпис студента)

Кондратьєва Ю. А.
(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 70с., 22 рис., 16 табл., 5 додатків, 12 джерел.

Об'єкт дослідження: мережа стандарту GSM-1800 у рівномірно забудованому районі середнього міста.

Предмет дослідження: радіус стільника, площа стільника, втрати на трасі між базовою і абонентською станціями, кількість абонентів у стільнику.

Мета роботи: при використанні різних емпіричних моделей отримати максимальні радіуси стільників для мережі стандарту GSM-1800 у районі середнього міста із рівномірною забудовою, відповісти на питання можливості побудови мережі у районі в залежності від його площі та густини населення.

У першому розділі роботи детально розглянуті та описані моделі втрат потужності сигналу на трасі між абонентською та базовою станціями: багатопроменева модель, модель COST-231 Neta, модель Уолфіша-Ікегамі.

В спеціальній частині було отримано максимальні радіуси стільників для кожної із моделей. Отримано обмеження стосовно площі району в залежності від густини його населення, при яких є можливість побудови даної стільникової мережі. Було доведено, що обмеження зверху виконуються за умовчужанням, тобто автоматично, а реально працюють для мережі саме обмеження знизу. Це обмеження є модельно-незалежним. Також було оцінено граничну густину населення, при перевищенні якої побудова стільникової мережі стандарту GSM-1800 є неможливою.

В економічній частині розраховано капітальні витрати на побудову мережі та експлуатаційні витрати на її обслуговування.

Підхід, описаний у проекті, може бути використаний для планування стільникових мереж у районах середнього міста із рівномірною забудовою.

СТІЛЬНИКОВА МЕРЕЖА, СТАНДАРТ GSM-1800, РАДІУС СТІЛЬНИКА, БАЛАНС ПОТУЖНОСТЕЙ, БАГАТОПРОМЕНЕВА МОДЕЛЬ, МОДЕЛЬ УОЛФІША–ІКЕГАМІ, МОДЕЛЬ COST-231 НАТА

ABSTRACT

Explanatory note: 70p., 22 fig., 16 tables., 5 appendices, 12 sources.

Object of research: the simplest model of the GSM-1800 standard network.

Subject of research: geometric, energy parameters of the network and parameters of network reliability.

The purpose of the diploma project: design and research of the simplest network of GSM-1800 standard, calculation of geometrical parameters of cells; cluster structure, power balance, maximum battery life and network reliability.

The first section of the paper provides basic information about log-distance model, COST-231 Hata model and Walfich–Ikegami model

In a special part, the maximum cell size for each of the models were obtained. We have obtained restrictions on the area of the district depending on the density of its population, under which it is possible to build this cellular network. It has been proven that upper restrictions are performed by default, i.e. automatically, and only lower restrictions actually work for the network. This limitation is model-independent. The maximum population density was also estimated, if it is exceeded, the construction of a cellular network of the GSM-1800 standard is impossible. In the economic part, the capital costs for the construction of the network and operating costs for its maintenance are calculated.

The approach described in the project can be used to plan cellular networks in the suburbs.

CELLULAR NETWORK, GSM-1800 STANDARD, MAXIMAL CELL RADIUS, LOG– DISTANCE PATH LOSS MODEL, COST-231 HATA MODEL, WALFISH– IKEGAMI MODEL

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БС – базова станція;

АС – абонентська станція;

ДСА – діаграма спрямованості антени;

СМО – система масового обслуговування;

АБ – акумуляторна батарея

ДБЖ – джерело безперебійного живлення

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 СТАН ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	11
1.1 Стан питання.....	11
1.1.1 Багатопроміньова модель.....	11
1.1.2 Модель COST-231 Nata	15
1.1.3 Модель Уолфіша-Ікегамі.....	16
1.2 Постановка задачі.....	22
1.3 Висновки.....	22
2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	23
2.1 Виведення нерівностей для допустимих втрат на трасі від абонентської до базової станції та навпаки для стандарту GSM–1800.....	23
2.1.1 Випадок 1 та 2 частотних каналів у стільнику.....	25
2.1.2 Випадок 3 та 4 частотних каналів у стільнику.....	26
2.2 Розрахунок максимального радіусу стільника стандарту GSM-1800 для різних моделей.....	27
2.2.1 Розрахунок максимального радіусу стільника для багатопроміньової моделі	27
2.2.2 Розрахунок максимального радіусу стільника для моделі COST-231 Nata.....	31
2.2.3 Розрахунок максимального радіусу стільника для моделі Уолфіша-Ікегамі.....	35
2.2.4 Підсумкова таблиця максимальних радіусів стільників для усіх моделей.....	42
2.3 Побудова графіків, що ілюструють можливість побудови мережі в залежності від населення та площі району.....	43
2.4 Висновки.....	51
3 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	54
3.1 Техніко-економічне обґрунтування.....	54

3.2 Вибір обладнання.....	54
3.3 Капітальні витрати	55
3.4 Експлуатаційні витрати.....	57
3.5 Висновки.....	59
ВИСНОВКИ.....	61
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	64
ДОДАТОК А. Відомість матеріалів дипломної роботи.....	66
ДОДАТОК Б. Перелік документів на оптичному носії.....	67
ДОДАТОК В. Обчислення у Mathcad для моделі Уолфіша-Ікегамі.....	68
ДОДАТОК Г. Відгук керівника економічного розділу.....	69
ДОДАТОК Д. Відгук керівника дипломної роботи.....	70

ВСТУП

Як нам вже відомо, у сучасні дні стільниковий зв'язок являється одним з найпоширеніших в Україні та у світі, тому планування та побудова стільникових мереж досі являється актуальною задачею сучасних телекомунікацій.

В даній роботі розглянуто мережі стандарту GSM-1800 для району середнього міста із рівномірною забудовою. Оскільки нами розглядається саме рівномірна забудова, то надалі ми можемо вважати стільники правильними шестикутниками. На практиці з хорошою точністю район з однотипною забудовою без великих площ та парків можна вважати рівномірно забудованим.

Для початку перед плануванням стільникової мережі необхідно оцінити можливість її побудови. На дане питання можна відповісти графічно – зобразити області параметрів, де в залежності від густини населення району та його площі буде показано, чи можлива для таких значень побудова мережі. Дані графіки будуються на оцінці радіуса стільника.

Як нам відомо [5], для стандарту GSM-1800 радіус стільнику може бути від 0,5 км до 35 км, але максимально можливе значення 35 км практично неможливо на практиці. Далі у роботі максимальний радіус стільника оцінюється на основі розрахунку втрат потужності на трасі [4] між базовою та абонентською станціями.

Розрахунок втрат потужності проводиться за багатьма емпіричними моделями, але у даній роботі для простоти нами розглядаються лише три моделі розрахунку втрат потужності: багатопроменева модель, модель COST-231 Hata, модель Уолфіша-Ікегамі.

Метою даної кваліфікаційної роботи є отримання максимального можливого радіусу стільника на основі вищевказаних трьох моделей а також відповісти на питання можливості побудови даної стільникової мережі у районі середнього міста із рівномірною забудовою.

Далі у економічній частині було успішно розраховано капітальні витрати на установку мережі та її експлуатаційні витрати на обслуговування. Метою економічного розділу є доведення того, що даний проект може бути успішно застосований при проектуванні мережі на практиці.

1 СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Стан питання

Наразі відомо дуже багато емпіричних моделей втрат потужності сигналу на трасі від базової станції до абонентської та навпаки. Але у даній роботі ми розглянемо лише ті моделі, які застосовуються в діапазоні, де працює стандарт GSM-1800, а саме – багатопроменева модель, модель COST-231 Hata та моделлю Уолфіша– Ікегамі.

Для початку означимо медіанні втрати для кожної моделі згідно [4]. Опираючись на [5], до медіанних втрат слід додавати величину, що дорівнює $0,68\sigma$, де σ – середнє квадратичне відхилення сигналу через флуктуації у точці прийому – це пов’язано із деякими статистичними особливостями флуктацій сигналу у точці прийому. Згідно [6] для моделей макросот σ зазвичай оцінюється від 7 до 10 дБ. У даній роботі далі буде використано значення:

$$\sigma = 10 \text{ дБ} \quad (1.1)$$

що максимізує статистичні втрати сигналу. Відповідний статистичний внесок у втрати

$$L_{\text{стат}} = 0,68\sigma = 0,68 \cdot 10 \text{ дБ} = 6,8 \text{ дБ} \quad (1.2)$$

Далі даний внесок буде враховано у роботі у підсумкових формулах втрат потужності сигналу для кожної з моделей. Дослідження втрат на основі таких моделей дасть змогу в рамках кожної з них отримати максимально можливу відстань між абонентською та базовою станціями, для якої потужність сигналу на вході приймача ще не буде нижчою за його чутливість. Очевидно, що така максимально можлива відстань і буде максимально можливим радіусом стільника в рамках досліджуваної моделі.

1.1.1 Багатопроменева модель.

Зв’язок потужності сигналу на виході передатчика та на вході приймача в рамках емпіричної багатопроменевої моделі [4] є наступним:

$$P_r = P_{rLOS} - 10n \lg R \quad (1.3)$$

де

$$P_{rLOS} = P_t - 20 \lg(4\pi) + 20 \lg \lambda - 20 \lg(R \cdot 10^3) \quad (1.4)$$

У формулах (1.3) та (1.4) – це потужність на виході передатчика у дБм, – потужність на вході приймача у дБм, – довжина хвилі у метрах та – відстань від базової до абонентської станції у км. Коефіцієнт називається експонентою згасання та для різних середовищ оцінюється згідно таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Значення експоненти згасання для різних середовищ

Середовище	Експонента згасання n
Вільний простір	2
Передмістя	2,7-3,5
Місто	3-5

Зазначимо, що згідно [7], формули (1.3) у такому вигляді має місце саме для макросот. Звідси виходить, що медіанними втратами у багатопроменевій моделі L_{6M} є різниця між потужністю на виході передатчика та на вході приймача:

$$L_{6M} = P_t - P_r \quad (1.5)$$

L_{6M} виражається у децибелах. Наголошуємо, що тут і надалі в оглядовому розділі різниця відповідних потужностей обчислюється лише на основі втрат на трасі між станціями. Врахування перетворень сигналів у самих станціях (підсилення у антенах, втрати у фідерах і т.д.) проведено вже у спеціальній частині. Для того, щоб отримати вираз для відповідних втрат, підставимо (1.4) у (1.3):

$$P_r = P_t - 20 \lg(4\pi) + 20 \lg \lambda - 20 \lg(R \cdot 10^3) - 10n \lg R \quad (1.6)$$

Та виразимо звідси L_{6M} :

$$\begin{aligned} L_{6M} = P_t - P_r &= -(-20 \lg(4\pi) + 20 \lg \lambda - 20 \lg(R \cdot 10^3) - 10n \lg R) \\ &= 20 \lg(4\pi) - 20 \lg \lambda + 20 \lg(R \cdot 10^3) + 10n \lg R. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Зазначаємо, що вираз (1.7) для медіанних втрат у даній моделі можна спростити. За властивостями логарифма:

$$\lg(R \cdot 10^3) = \lg R + \lg(10^3) = \lg R + 3 \quad (1.8)$$

звідки вираз (1.7) можна переписати як:

$$\begin{aligned} L_{\text{бм}} &= P_t - P_r = \\ &= 20 \lg(4\pi) - 20 \lg \\ &+ 20 \lg(R \cdot 10^3) + 10n \lg R \\ &= 60 + 20 \lg(4\pi) - 20 \lg \lambda + (20 + 10n) \lg R. \end{aligned} \quad (1.9)$$

В подальшому наголошуємо, що замість довжини хвилі у формулах для втрат на трасі зручно використовувати частоту. Оскільки сигнал є електромагнітною хвилею, що розповсюджується зі швидкістю світла $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, то між частотою f , вираженою у Гц, та довжиною хвилі λ , вираженою у метрах є відомий зв'язок:

$$c = \lambda f \Rightarrow f = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{\lambda} \quad (1.10)$$

Виразимо частоту також у МГц, відповідне значення нехай дорівнює F . Тоді

$$f = 10^6 F \quad (1.11)$$

Дійсно, наприклад, для частоти 1 МГц, $F=1$, $f = 10^6$, що ілюструє рівність (1.11). Тоді згідно (1.11) та (1.10) маємо:

$$f = \frac{300 \text{ м/с}}{\lambda} \cdot 10^6 \Rightarrow F = \frac{300}{\lambda} \quad (1.12)$$

Таким чином маємо корисну формулу:

$$\lambda = \frac{300}{F} \quad (1.13)$$

Де λ – довжина хвилі у метрах та F – частота у МГц. На основі цієї формули перепишемо (1.9):

$$L_{\text{бм}} = P_t - P_r = 60 + 20 \lg(4\pi) - 20 \lg\left(\frac{300}{F}\right) + (20 + 10n) \lg R \quad (1.14)$$

За властивостями логарифму:

$$\lg\left(\frac{300}{F}\right) = \lg(300) - \lg(F) = \lg(3 \cdot 100) - \lg(F) = \lg(3) + 2 - \lg F \quad (1.15)$$

Відповідно, остаточно записуємо медіанні втрати у багатопроменевій моделі:

$$\begin{aligned} L_{6M} &= P_t - P_r \\ &= 60 + 20 \lg(4\pi) - 20(\lg(3) + 2 - \lg(F)) \\ &\quad + (20 + 10n)\lg R \\ &= 60 + 20 \lg(4\pi) - 20 \lg(3) - 40 + 20 \lg(F) \\ &\quad + (20 + 10n)\lg R \\ &= 20 + 20 \lg\left(\frac{4\pi}{3}\right) + 20 \lg(F) + (20 + 10n)\lg R \end{aligned} \quad (1.16)$$

Оскільки

$$20 + 20 \lg\left(\frac{4\pi}{3}\right) \approx 32,44 \quad (1.17)$$

то врахувавши статистичні особливості втрат (1.2), остаточно пишемо вираз для втрат L_6 на трасі у багатопроменевій моделі:

$$\begin{aligned} L_6 &= 32,44 + 20 \lg(F) + (20 + 10n)\lg(R) + 6,8 \\ &= 39,24 + 20 \lg(F) + (20 + 10n)\lg(R), \end{aligned} \quad (1.18)$$

Де L_6 – втрати на трасі у дБ, F – частота у МГц, та R – відстань від базової до абонентської станції у км. $6L$

У висновку зауважуємо, що у [4] формули для втрат у багатопроменевій моделі записані з урахуванням підсилення сигналів у антенах абонентської та базової станцій. Однак, як відомо [5], ці підсилення ураховуються окремо від втрат на трасі між станціями, тому при викладенні цього підpunkту у даній кваліфікаційній роботі внески, що описують підсилення потужності сигналу у антенах, не враховувалися. Дані внески враховано в спеціальній частині. Зауважимо, що викладені тут формули для втрат на трасі у багатопроменевій моделі є добре узгоджені також і з іншими джерелами, зокрема з [8].

1.1.2. Модель COST-231 Hata.

Модель COST 231 є розширеною версією моделі Хата. Діапазон частот: 1800-1900 МГц. Хоча дані моделі Окамура розширені до 1920 МГц, модель Хата застосовна тільки на частотах від 150 до 1500 МГц. У діапазоні GSM-1800 розрахунки ведуться на моделі COST-231 Hata. Умови для можливості застосування моделі:

$$F = 1500 - 1800 \text{ МГц}, h_{\text{БС}} = 30 - 200 \text{ м}, h_{\text{АС}} = 1 - 10 \text{ м}, \quad (1.19)$$

де F – частота, $h_{\text{БС}}$ – висота базової станції, $h_{\text{АС}}$ – висота абонентської станції

Згідно [4], у емпіричній моделі COST-231 Hata зв'язок потужності сигналу на виході передатчика та на вході приймача є наступним:

$$P_r = P_t - A - B \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) + 13,82 \lg \left(\frac{H_{\text{БС}}}{H_0} \right) + a(f, H_{\text{АС}}) - (44,9 - 6,55 \lg \left(\frac{H_{\text{БС}}}{H_0} \right) \lg \left(\frac{R}{R_0} \right) - C, \quad (1.20)$$

де A – постійна складова витрат (див. таблиця 1.2), B – коефіцієнт корекції частоти (див. таблиця 1.2), $a(f, H_{\text{АС}})$ – корегуючий коефіцієнт для висоти антени АС, C – коефіцієнт корекції витрат в залежності від середовища (див. таблиця 1.3)

Таблиця 1.2 – Значення коефіцієнтів A та B

Частота робочого діапазону f , МГц	A , дБ	B
$150 \leq f \leq 1500$	69,55	26,16
$1500 \leq f \leq 2000$	46,33	33,9

Таблиця 1.3 – Значення коефіцієнту C для різних середовищ

Умови розповсюдження	C , дБ
Відкритий простір, передмістя, місто	0
Метроплітенський район	3

Та з урахуванням статистичних особливостей остаточно маємо втрати на трасі для моделі COST-231 Hata:

$$L_p'' = 48,55 + 35,4 \lg F - 13,82 \lg H_{BC} - (1,1 \lg F - 0,7) H_{AC} + (44,9 - 6,55 \lg H_{BC}) R, \quad (1.21)$$

де, F – частота сигналу у МГц, L_p'' – коефіцієнт втрат на трасі у дБм H_{BS} – висота базової станції у м, R – відстань між базовою та абонентською станціями у км, H_{AS} – висота абонентської станції у м. Формула, яка записана у (1.20) є емпіричною, це означає, що вона є результатом фітування великої кількості експериментальних даних.

Зауважимо, що вираз (1.21) співпадає з описом моделі COST-231 Hata для середнього міста у роботі [5].

Формально моделі Оокура і Хата і COST-231 Hata можна використовувати тільки для висоти антени базової станції, що перевищує 30м, однак їх застосування можливе і для більш низької висоти за умови, що сусідні будови значно нижче антени.

Модель COST-231 Hata не підходить для оцінки затягування сигналу при розташуванні між рухомою та базовою станціями менше 1 км. В цьому випадку затування сильно залежить від топографії місцевості, в якій відбувається сигнал. Цю модель також не можна використовувати для оцінки поширення сигналу по вулицях з високими будовами (за так званими вуличними каньонами).

У даному проекті у спеціальній частині ми розглядатимемо випадок у районі середнього міста з висотою базових станцій 50м та висотою абонентських станцій 1,8м, оскільки висоту абонентської станції ми беремо як зріст людини.

1.1.3 Модель Уолфіша–Ікегамі

Відповідно [4], в рамках моделі Уолфіша–Ікегамі, у випадку непрямой видимості між антенами базової та абонентської станцій мають виконуватись наступні співвідношення:

$$P_r = P_t + L_{rt}, \quad (1.22)$$

Де P_t – це потужність на виході передатчика у дБм, P_r – потужність на вході приймача у дБм, L_{rt} – з оберненим знаком медіанні втрати потужності на трасі, що виражаються формулою [4]

$$L_{rt} = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{mds}, & L_{rts} + L_{mds} \leq 0 \\ L_0, & L_{rts} + L_{mds} \geq 0 \end{cases}, \quad (1.23)$$

де L_{rts} – внесок у втрати, що має місце через дифракцію та розсіяння, L_{mds} – внесок, що має місце через багатопроменеве розповсюдження хвиль, L_0 – внесок, що описує втрати у вільному середовищі. Всі внески у формулі (1.23) виражаються у дБ. Зазначаємо, що для простоти у даній кваліфікаційній роботі обмежимося лише випадком непрямої видимості.

Звідси, внесок обчислюється за наступною формулою [4]:

$$L_0 = -32,45 - 20 \lg(F) - 20 \lg(R) \quad (1.24)$$

Де F – частота у МГц та R – відстань між абонентською і базовою станціями у км.

Внесок L_{rts} обчислюється наступним чином [4]:

$$L_{rts} = 16,9 + 10 \lg(w) - 10 \lg(F) - 20 \lg(\Delta h_r) - L_{ori}(\varphi) \quad (1.25)$$

де w – середня ширина вулиці у м, Δh_r – відстань між антеною мобільної станції та дахами будівель у м, $L_{ori}(\varphi)$ – внесок, що вимірюється у дБ та описує залежність втрат від кута орієнтації вулиці відносно напрямку розповсюдження хвилі від базової станції до абонентської. Значення цього внеску записані у таблиці 1.4.

Наголошуємо, що у формулах з таблиці 1.4 кут вимірюється в градусах, а не в радіанах.

Таблиця 1.4 – Значення внеску $L_{ori}(\varphi)$ в залежності від кута

$\varphi, ^\circ$	$L_{ori}(\varphi), \text{дБ}$
$0 \leq \varphi < 35$	$-10 + 0,354\varphi$
$35 \leq \varphi < 55$	$2,5 + 0,075(\varphi - 35)$
$55 \leq \varphi \leq 90$	$4 - 0,114(\varphi - 55)$

Досить цікавою є залежність $L_{ori}(\varphi)$, див. рис. 1.1.

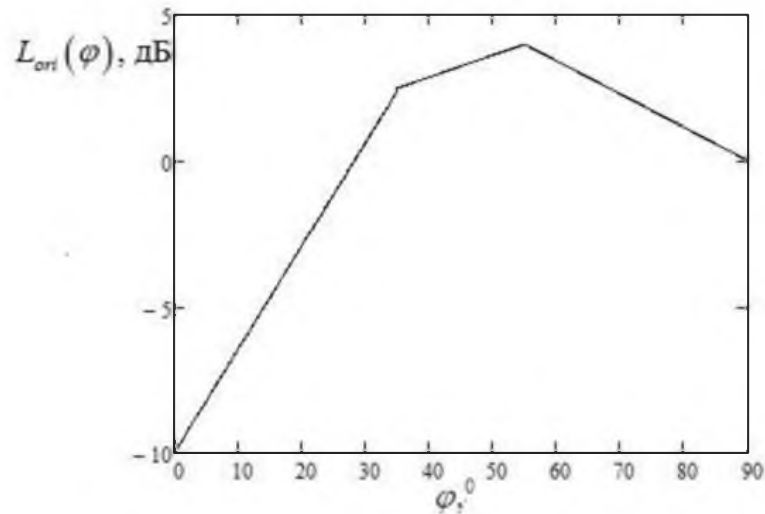


Рисунок 1.1 – Графік залежності $L_{ori}(\varphi)$

З цього графіку ми розуміємо, що втрати не зростають монотонно, в залежності від кута. В межах даної емпіричної моделі втрати зростають при $0 \leq \varphi < 55$, а при $55 \leq \varphi \leq 90$ втрати спадають, та найбільші втрати мають місце при куті орієнтації.

Внесок $L_{m ds}$ у формулі (1.25) обчислюється за наступною формулою [4]:

$$L_{m ds} = -L_{b sh} + k_a - k_d \lg(R) - k_f \lg(F) - 9 \lg(b) \quad (1.26)$$

де $L_{b sh}$ – збільшення потужності за рахунок того, що антена базової станції знаходиться вище на дахах будівель, k_a – втрати у дБ, що залежать від відстані між базовою і абонентською станціями, а також від висоти базової станції, k_d – коефіцієнт коректування втрат, що залежить від відстані між абонентською і базовою станціями, k_f – коефіцієнт втрат через дифракцію, що залежить від частоти, b – середня відстань між протилежними будівлями у м. Значення величин $L_{b sh}$, k_a , k_d , k_f наведені у таблицях 1.5–1.8, відповідно. У даних таблицях ϵ висотою антени базової станції над дахами будівель у м та ϵ висотою будівель у м.

Таблиця 1.5 – Значення L_{bsh} в залежності від Δh_t

$\Delta h_t, \text{м}$	$L_{bsh}, \text{дБ}$
$\Delta h_t > 0$	$-18\lg(1 + \Delta h_t)$
$\Delta h_t \leq 0$	0

Таблиця 1.6 – Значення k_a в залежності від Δh_t та R

$\Delta h_t, \text{м}; R, \text{км}$	k_a
$\Delta h_t > 0$	54
$\Delta h_t \leq 0, R \geq 0,5$	$54 - 0,8\Delta h_t$
$\Delta h_t \leq 0, R \leq 0,5$	$54 - 0,8 \cdot \Delta h_t \cdot 2R$

Таблиця 1.6 – Значення k_d в залежності від Δh_t

$\Delta h_t, \text{м}$	k_d
$\Delta h_t > 0$	18
$\Delta h_t \leq 0$	$18 - \frac{\Delta h_t}{h_b}$

Таблиця 1.7 – Значення k_f в залежності від середовища та частоти

Середовище	k_f
Передмістя, місто	$-4 + 0,7\left(\frac{F}{925} - 1\right)$
Метрополітенський район	$-4 + 1,5\left(\frac{F}{925} - 1\right)$

Для повного розуміння проілюструємо фізичний сенс вище згаданих параметрів на рисунках (див. рис. 1.2 та рис. 1.3).

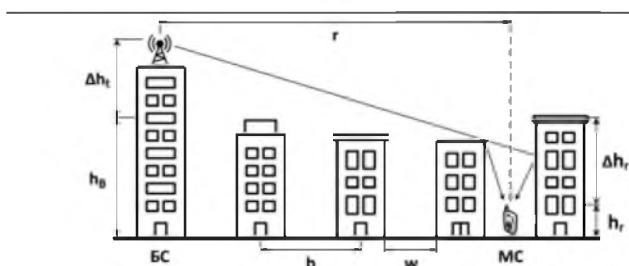


Рисунок 1.2 [4] – Ілюстрація параметрів моделі Уолфіша–Ікегамі

Зазначаємо, що випадок [4] часто розглядають, коли параметри w та b пов'язані співвідношенням

$$b = 2w \quad (1.27)$$

Модель Уолфіша–Ікегамі має наступні обмеження [4]. Частота F у МГц має лежати у діапазоні $800 < F < 2000$, висота підйому антени базової станції над землею повинна лежати у діапазоні від 4 м до 50м, висота підйому антени абонентської станції над землею повинна лежати у діапазоні від 1 м до 3 м, відстань R у км між абонентською і базовою станціями повинна лежати у діапазоні $0,02 < R < 5$.

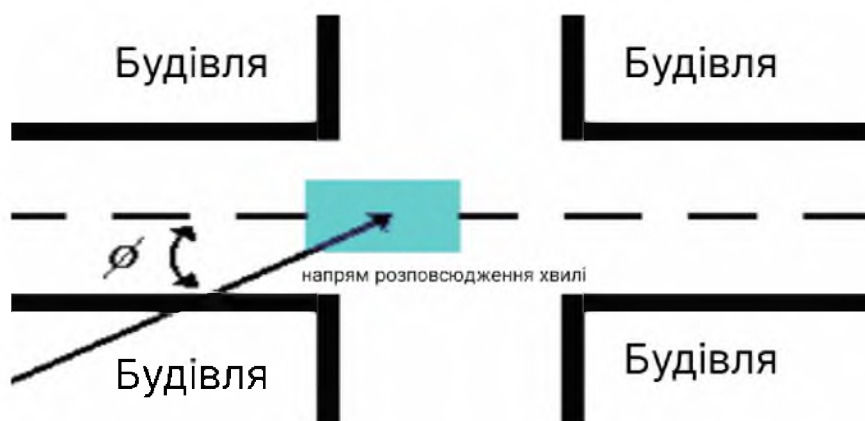


Рисунок 1.3 [10] – Ілюстрація кута орієнтації вулиці φ відносно напрямку розповсюдження хвилі

Для проведення подальших обчислень випишемо втрати в моделі Уолфіша–Ікегамі для середнього міста. Для простоти у кваліфікаційній роботі

розглядається лише випадок непрямой видимості та випадок, коли антена базової станції знаходиться вище за дахи будівель. У такому випадку згідно (1.22) медіанні втрати L_{ym} у даній моделі дорівнюють:

$$L_{ym} = P_t - P_r = -L_{rt} \quad (1.28)$$

де «зберемо до купи» результати, наведені у формулах (1.23)–(1.25) і таблицях 1.4–1.8 для випадку середнього міста та антени базової станції, що є вищою за дахи будівель:

$$L_{rt} = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{mds}, & L_{rts} + L_{mds} \leq 0 \\ L_0, & L_{rts} + L_{mds} \geq 0 \end{cases},$$

$$L_0 = -32,45 - 20 \lg(F) - 20 \lg(R),$$

$$L_{rts} = 16,9 + 10 \lg(w) - 10 \lg(F) - 20 \lg(\Delta h_r) - L_{ori}(\varphi)$$

$$L_{ori}(\varphi) = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi, & 0 \leq \varphi < 35 \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35), & 35 \leq \varphi < 55, \\ 4 - 0,114(\varphi - 55), & 55 \leq \varphi \leq 90 \end{cases}, \quad (1.29)$$

$$L_{mds} = 18 \lg(1 + \Delta h_t) - 54 - 18 \lg(R) - \left(-4 + 0,7 \left(\frac{F}{925} - 1 \right) \right) \lg(F) + 9 \lg(b),$$

Де F – частота у МГц, параметр має бути заданим у км, параметри Δh_t , b , w , Δh_r мають бути задані у м, кут має бути заданим у градусах. Фізичний сенс відповідних параметрів проілюстровано на рис. 1.2 та рис. 1.3.

Отже, з урахуванням статистичних особливостей, остаточно доходимо до висновку, що для випадку, що розглядається, втрати на трасі у моделі Уолфіша–Ікегамі L_y , виражені у дБ, описуються формулою:

$$L_y = -L_{rt} + 6,8 \quad (1.30)$$

де внесок L_{rt} та всі величини, що до нього входять, описані у формулі (1.29). Зазначаємо, що цей опис добре узгоджується з описом визначеної моделі і у інших джерелах, зокрема у [11].

1.2 Постановка задачі

У даній роботі розглядаються емпіричні моделі розрахунку втрати потужності на трасі, які застосовуються в діапазоні, де працює стандарт GSM-1800, а саме – багатопроменева модель, модель COST-231 Hata та моделлю Уолфіша– Ікегамі. Постановкою задачі спеціальної частини є: знайти максимально можливі радіуси стільників для мережі стандарту GSM–1800 на основі багатопроменевої моделі, моделі COST-231 Hata та моделі Уолфіша– Ікегамі. На основі отриманих результатів побудувати графіки, що в залежності від населеності та площі району ілюструють можливість побудови стільникової мережі стандарту GSM–1800 такому районі. Зробити висновок з цих графіків.

1.3 Висновки

У даному розділі були детально розглянуті та описані базові відомості про моделі COST-231 Hata, Уолфіша-Ікегамі та багатопроменеву модель. Були виведені формули для розрахунку максимально можливих радіусів стільників, які у подальшому знадобляться у спеціальній частині кваліфікаційної роботи. Задача, поставлена перед даною кваліфікаційною роботою, є актуальною.

2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Виведення нерівностей для допустимих втрат на трасі від абонентської до базової станції та навпаки для стандарту GSM–1800.

Для доведення того, що сигнал надійде від базової станції до абонентської та навпаки, навіть за тої умови, коли абонентська станція установлена на межі стільника, розраховується баланс потужностей. Для проходження сигналу від базової до абонентської станції використовується формула:

$$P_{inAC} = P_{outBC} + G_{aAC} + G_{aBC} - L_{FBC} - L_{FAC} - L - L_C, \quad (2.1)$$

де P_{inAC} – потужність сигналу на вході в приймач абонентської станції у дБм, P_{outBC} – потужність сигналу на виході передавача базової станції у дБм, G_{aBC} та G_{aAC} – коефіцієнти підсилення (у дБ) антен базової та абонентської станцій, відповідно; L_{FBC} та L_{FAC} – коефіцієнти втрат (у дБ) у фідерах базової та абонентської станцій, відповідно; L_C – втрати (у дБ) в комбайнері базової станції та L_P – втрати на трасі у дБ.

Для проходження сигналу від абонентської до базової станції використовується формула:

$$P_{inBC} = P_{outAC} + G_{aAC} + G_{aBC} + G_{dBC} - L_{FBC} - L_{FAC} - L - L_C, \quad (2.2)$$

де P_{inBC} – потужність сигналу на вході в приймач базової станції у дБм, P_{outAC} – потужність сигналу на виході передавача абонентської станції у дБм, G_{dBC} – виграш потужності (у дБ) за рахунок рознесеного прийому сигналів.

Максимальна потужність на виході передатчика абонентської станції для стандарту GSM-1800 дорівнює:

$$P_{outAC} = 1\text{Вт}. \quad (2.3)$$

Оскільки потужність сигналу у стільникових мережах розраховується не у ватах, як вказано вище, а у децибел-міліватах, переведемо дану величину у дБм:

$$P_{outAC} = 10\lg \frac{1\text{Вт}}{1\text{мВт}} = 10\lg \frac{10^3\text{мВт}}{1\text{мВт}} = 30\text{дБм}, \quad (2.4)$$

Потужність на виході передавача базової станції становить:

$$P_{outBC} = 28 \text{ Вт.} \quad (2.5)$$

Зауважимо, що відповідна величина може бути більшою. Проте, якщо ми доведемо, що сигнал дійде до абонентської станції при відповідному значенні 28 Вт, то він гарантовано дійде і при більших значеннях. Відповідно, ми матимемо P_{outBC} у дБм:

$$P_{outBC} = 10 \lg \frac{P'}{\text{мВт}} \approx 44,5 \text{ дБм.} \quad (2.6)$$

Коефіцієнт підсилення антени базової станції G_{aBC} стандарту GSM-1800 становить від 15 до 17 дБ, далі у розрахунках буде використовуватись значення:

$$G_{aBC} = 15 \text{ дБ,} \quad (2.7)$$

оскільки якщо можливо побудувати стільникову мережу для значення 15 дБ, то гарантовано є можливість побудови відповідної мережі і для підсилення у 17 дБ.

Як ми вже з'ясували з пункту [1], відповідні коефіцієнти для стандарту GSM-1800 будуть дорівнювати наступним значенням:

$$L_{FBC} = 2 \text{ дБ, } G_{aAC} = 0 \text{ дБ, } L_{FAC} = 0 \text{ дБ.} \quad (2.8)$$

Зауважимо, що у випадку коли ми використовуємо у своїй роботі трьох- або чотирьохсекторних стільники, L_c вони оцінюють як 3 дБ, а7 у випадку, коли ми маємо у стільнику один або два частотних канали, то відповідно $L_c = 0$ дБ.

При використанні рознесеного прийому сигналів базовою станцією будемо оцінювати виграш потужності як 3 дБ:

$$G_{dBC} = 3 \text{ дБ,} \quad (2.9)$$

Знайдені величини P_{inAC} та P_{inBC} повинні перевищувати чутливість приймачів мобільної станції – 104 дБм та базової станції – 111 дБм. Оскільки у випадку, де потужність сигналу на вході в приймач базової станції менша за

його чутливість, базова станція сприймає сигнал, що на неї прийшов. А для прийому сигналу абонентською станцією необхідно, щоб потужність цього сигналу була не меншою за чутливість приймача даної станції.

Значення параметру L_C є різними в залежності від кількості частотних каналів у стільнику, тому далі нам необхідно буде отримати нерівності для обох випадків: і у випадку 1 та 2 частотних каналів у стільнику та у випадку 3 і 4 частотних каналів у стільнику.

2.1.1. Випадок 1 та 2 частотних каналів у стільнику

За формулами (2.1)-(2.7) для випадку 1 та 2 частотних каналів у стільнику отримаємо:

$$P_{inAC} = 44,472 + 15 + 0 - 2 - 0 - L = 57,472 - L, \quad (2.10)$$

Оскільки значення P_{inAC} має бути більшим за чутливість приймача мобільної станції, отримаємо нерівність:

$$57,472 - L \geq -104 \Leftrightarrow L \leq 161,472, \quad (2.11)$$

Дана нерівність є правдивою для траси від базової станції до абонентської, передача сигналів на цій трасі здійснюється на частоті від 1805 до 1880 МГц. Для розрахунку далі ми візьмемо середнє значення частоти:

$$F_{BC \rightarrow AC} = \frac{1805+1880}{2} = 1842,5 \text{ МГц}, \quad (2.12)$$

Оскільки втрати залежать від відстані між абонентською і базовою станціями, частоти, та ще декількох параметрів, які не будуть конкретно підкреслюватись у даному розділі, ми відповідно до (2.11), (2.12) отримаємо нерівність:

$$L(R; 1842,5\text{МГц}) \leq 161,472\text{дБ}, \quad (2.13)$$

Нерівність (2.17) підкреслює максимально допустимі втрати на трасі від базової станції до абонентської у випадку 1 та 2 частотних каналів у стільнику, а також вказує на залежність втрат від відстані між станціями.

Тепер отримаємо нерівність для траси від абонентської траси до базової:

$$P_{inBC} = 30 + 0 + 15 + 3 - 2 - 0 - L - 0 = 46 - L \quad (2.15)$$

Отже, на основі (2.9) ми отримаємо:

$$46 - L \geq -111 \rightarrow L \leq 157 \text{ дБ} \quad (2.16)$$

Для стандарту GSM-1800 передача сигналу на трасі від абонентської до базової станції ведеться на частоті від 1710 до 1785 МГц. Для подальшого розрахунку ми візьмемо середню частоту з даного діапазону:

$$F_{AC \rightarrow BC} = \frac{1710+1785}{2} = 1747,5 \text{ МГц}, \quad (2.17)$$

Отримавши середню частоту, на основі (2.16) та (2.17) ми опишемо нерівність, яка описує максимально допустимі втрати на трасі від абонентської станції до базової:

$$L(R; 1747,5 \text{ МГц}) \leq 157 \text{ дБ}, \quad (2.18)$$

Оскільки сигнал має прийти і від абонентської станції до базової, і навпаки, тож нерівності (2.14) та (2.18) мають виконуватись одночасно, тому має виконуватись система нерівностей:

$$\begin{cases} L(R; 1842,5 \text{ МГц}) \leq 161,472 \text{ дБ} \\ L(R; 1747,5 \text{ МГц}) \leq 157 \text{ дБ} \end{cases} \quad (2.19)$$

Виходячи із отриманої системи, ми бачимо, що втрати на трасі будуть залежати від значення параметра R , тому розв'язок цієї системи буде обмеженим зверху, а значення R буде максимальним можливим радіусом стільника у випадку 1 та 2 частотних каналів у стільнику.

2.1.2. Випадок 3 та 4 частотних каналів у стільнику

Наведені раніше рівняння, які описують трасу від абонентської станції до базової та навпаки для випадку 1 та 2 частотних каналів у стільнику, будуть справедливі і для випадку 3 та 4 частотних каналів, але різним є значення параметру L_C , проте даний параметр використовується лише при розрахунку втрат на трасі від базової станції до абонентської. Тож ми отримаємо, що нерівність (2.18) виконується і для випадку 3 та 4 частотних каналів у стільнику.

Виведемо нерівність для траси базової станції до абонентської. На основі формул (2.1) та (2.6)-(2.9) ми отримаємо для випадку 3 та 4 частотних каналів наступну рівність:

$$P_{inAC} = 44,472 + 15 + 0 - 2 - 0 - 3 - L = 54,472 - L, \quad (2.20)$$

Звідси отримаємо:

$$54,472 - L \geq -104 \leftrightarrow L \leq 158,472, \quad (2.21)$$

На основі (2.13) ми отримаємо, що у випадку 3 та 4 частотних каналів у стільнику втрати на трасі від базової станції до абонентської мають задовольняти наступній нерівності:

$$L(R; 1842,5\text{МГц}) \leq 158,472, \quad (2.22)$$

Отже, для випадку 3 та 4 частотних каналів у стільнику отримаємо систему нерівностей:

$$\begin{cases} L(R; 1842,5\text{МГц}) \leq 158,472\text{дБ} \\ L(R; 1747,5\text{МГц}) \leq 157\text{дБ} \end{cases} \quad (2.23)$$

Максимально допустимим значення радіусу стільнику R буде максимально можливе значення R, яке буде задовольняти систему нерівностей (2.23).

2.2 Розрахунок максимального радіуса стільника стандарту GSM-1800 для різних моделей

2.2.1 Розрахунок максимального радіуса стільника для багатопроменевої моделі

Для початку отримаємо максимальний радіус стільника для випадку 1 та 2 частотних каналів. За формулами (1.18) та (2.19) отримаємо:

$$39,24 + 20 \lg(1747,5) + (20 + 10n) \lg R \leq 157 \quad (2.24)$$

Оскільки для міста показник n знаходиться в діапазоні від 3 до 5 [1], ми виберемо значення n=5. Це пов'язано із тим, що у випадку, якщо мережу можна побудувати для n = 5, то гарантовано дану мережу можна побудувати і для менших значень цього показника. Тож отримаємо нерівність:

$$\begin{aligned} 39,24 + 20 \lg(1747,5) + (20 + 10 \cdot 5) \lg R \leq 157 &\Leftrightarrow \\ (2 \cdot 10 \cdot 5) \lg R \leq 157 - 39,24 - 20 \lg(1747,5) & \end{aligned} \quad (2.25)$$

Порахуємо, що:

$$157 - 39,24 - 20 \lg(1747,5) \approx 52,91 \quad (2.26)$$

Далі на основі (2.24) отримаємо:

$$70 \lg R \leq 52,91 \Rightarrow \lg R \leq \frac{52,91}{70} \Rightarrow \lg R \leq 0,76 \Rightarrow R \leq 10^{0,76} \approx 5,75 \text{ км} \quad (2.27)$$

(2.27) є розв'язком нерівності (2.24), на рис.2.1 можемо побачити графічний розв'язок нерівності:

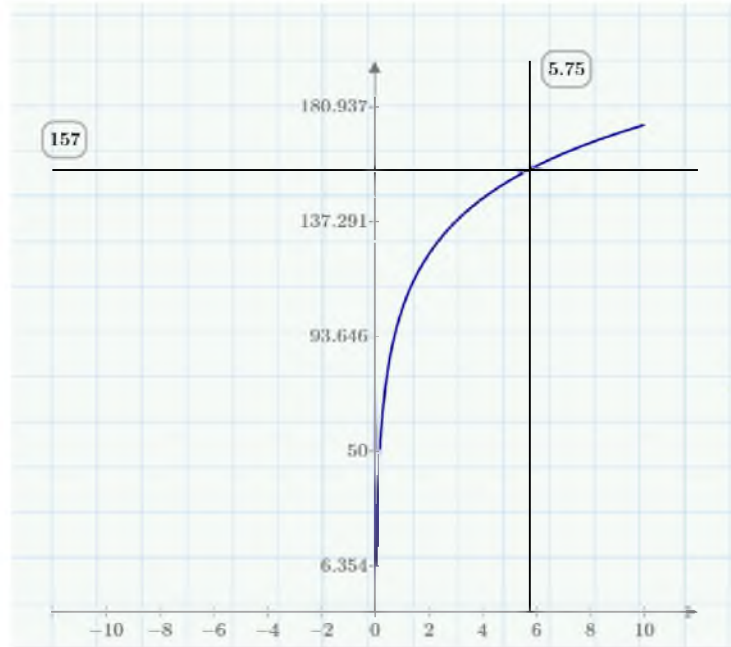


Рисунок 2.1 – До розв'язання нерівності на максимально можливі втрати на трасі від абонентської станції до базової для багатопроменевої моделі

На рис. 2.1. зображена залежність втрат від відстані між абонентською та базовою станціями для частоти 1747,5 МГц у багатопроменевій моделі для $n = 5$:

$$L(R) = 39,24 + 20 \lg(1747,5) + 70 \lg R \quad (2.28)$$

Розглянемо тепер другу нерівність з системи (2.19) для $n=5$:

$$39,24 + 20 \lg(1842,5) + (20 + 10 \cdot 5) \lg R \leq 161,472 \Leftrightarrow \quad (2.29)$$

$$(2 \cdot 10 \cdot 5) \lg R \leq 161,472 - 39,24 - 20 \lg(1842,5)$$

Оскільки:

$$161,472 - 39,24 - 20 \lg(1842,5) \approx 56,92 \quad (2.30)$$

Тоді отримаємо, що:

$$70 \lg R \leq 53692 \Rightarrow \lg R \leq \frac{56,92}{70} \Rightarrow \lg R \leq 0,77 \Rightarrow R \leq 10^{0,77} \approx 6,46 \text{ км}, \quad (2.31)$$

Що є розв'язком нерівності (2.29). Проілюструємо це графічно на рис. 2.2. На рис. 2.2. зображена залежність втрат від відстані між абонентською та базовою станціями для частоти 1842,5 МГц у багатопроменевій моделі для $n = 5$:



Рисунок 2.2 – До розв'язання нерівності на максимально можливі втрати на трасі від базової станції до абонентської для багатопроменевої моделі у випадку 1 і 2 частотних каналів у стільнику

$$L(R) = 39,24 + 20 \lg(1842,5) + 70 \lg R \quad (2.32)$$

Тепер запишемо систему (2.19) у наступному вигляді:

$$\begin{cases} R \leq 5,75 \text{ км} \\ R \leq 6,46 \text{ км} \end{cases} \Leftrightarrow R \leq 5,75 \text{ км}, \quad (2.33)$$

Отже, для випадку 1 та 2 частотних каналів ми отримуємо, що максимальний радіус стільника дорівнює:

$$R_{max}^{(1,2)} = 5,75 \text{ км} \quad (2.34)$$

Тепер розрахуємо максимальний радіус стільника для випадку 3 та 4 частотних каналів у стільнику. Оскільки у нас співпадає нерівність (2.8) для випадків 1 та 2 та 3 та 4 частотних каналів у стільнику, то розв'язок першої з нерівностей (2.23) буде співпадати і його вже отримано вище (2.27). Для розв'язку другої нерівності з (2.23), обравши $n = 5$, ми запишемо:

$$39,24 + 20 \lg(1842,5) + (20 + 10 \cdot 5) \lg R \leq 158,472 \Leftrightarrow \quad (2.35)$$

$$(2 \cdot 10 \cdot 5) \lg R \leq 158,472 - 39,24 - 20 \lg(1842,5)$$

Порахуємо, що:

$$158,472 - 39,24 - 20 \lg(1842,5) \approx 53,92 \quad (2.36)$$

тоді отримаємо, що:

$$70 \lg R \leq 53,92 \Rightarrow \lg R \leq \frac{53,92}{70} \Rightarrow \lg R \leq 0,77 \Rightarrow R \leq 10^{0,77} \approx 5,88 \text{ км}, \quad (2.37)$$

Вираз (2.37) є розв'язком нерівності (2.35), також проілюструємо це графічно на рис. 2.3:



Рисунок 2.3 – До розв'язання нерівності на максимально можливі втрати на трасі від базової станції до абонентської для багатопроменевої моделі у випадку 3 і 4 частотних каналів у стільнику

Отримаємо, що у випадку 3 та 4 частотних каналів система нерівностей буде мати вигляд:

$$\begin{cases} R \leq 5,75 \text{ км} \\ R \leq 5,88 \text{ км} \end{cases} \Leftrightarrow R \leq 5,75 \text{ км}, \quad (2.38)$$

Отже, для випадку 3 та 4 частотних каналів ми отримуємо, що максимальний радіус стільника дорівнює

$$R_{max}^{(3,4)} = 5,75 \text{ км} \quad (2.39)$$

2.2.2 Розрахунок максимального радіуса стільника для моделі COST-231 Hata

У діапазоні GSM-1800 розрахунки ведуться на моделі COST-231 Hata.

Умови для можливості застосування моделі:

$$F = 1500 - 1800 \text{ МГц}, h_{\text{БС}} = 30 - 200 \text{ м}, h_{\text{АС}} = 1 - 10 \text{ м} \quad (2.40)$$

У даному проекті ми розглядаємо випадок у районі середнього міста з висотою базових станцій 50м та висотою абонентських станцій 1,8м, оскільки висоту абонентської станції ми беремо як зріст людини. Для простоти далі при розрахунках ми обмежимося цими параметрами:

$$F = 1747,5 \text{ МГц}, h_{\text{БС}} = 50 \text{ м}, h_{\text{АС}} = 1,8 \text{ м} \quad (2.41)$$

Для початку розглянемо випадок 1 та 2 частотних каналів у стільнику.

Для розрахунку ми запишемо першу із нерівностей та (2.19), враховуючи параметри (2.41):

$$\begin{aligned} L = 48,55 + 35,4 \lg(1842,5) - 13,82 \lg(50) - (1,1 \lg(1842,5) - \\ 0,7)1,8 + (44,9 - 6,55 \lg(50)) \lg R \leq 161,472 \Leftrightarrow (44,9 - \\ 6,55 \lg(50)) \lg R \leq 161,472 - 48,55 - 35,4 \lg(1842,5) + \\ 13,82 \lg(50) + (1,1 \lg(1842,5) - 0,7)1,8 \end{aligned} \quad (2.42)$$

Далі порахуємо, що:

$$(44,9 - 6,55 \lg(50)) \approx 33,77 \quad (2.43)$$

Та:

$$161,472 - 48,55 - 35,4 \lg(1842,5) + 13,82 \lg(50) + (1,1 \lg(1842,5) - 0,7)1,8 \approx 26,01 \quad (2.44)$$

Отримаємо, що нерівність (2.42) набуде вигляду:

$$33,77 \lg R \leq 26,01 \Rightarrow \lg R \leq 0,77 \Rightarrow R \leq 10^{0,77} \Rightarrow R \leq 5,90 \text{ км} \quad (2.45)$$

Вираз (2.45) є вирішенням нерівності (2.42), проілюструємо це також графічно на рис. 2.4:

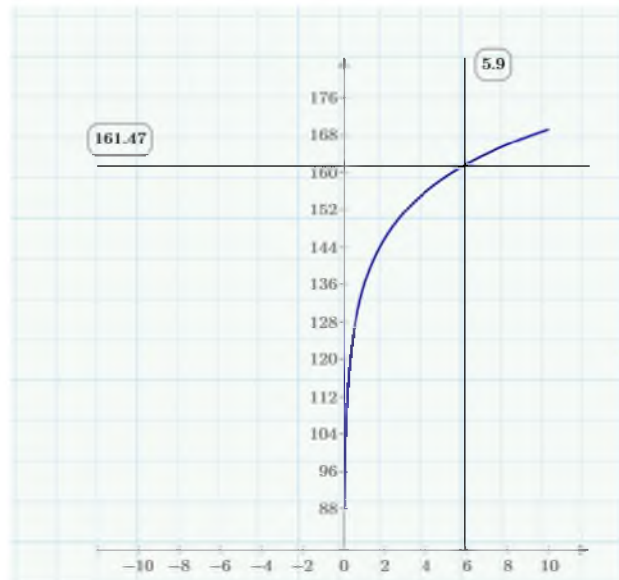


Рисунок 2.4 – До розв'язання нерівності на максимально можливі втрати на трасі від абонентської станції до базової для моделі COST-231 Hata

На рис. 2.4 зображено залежність втрат на трасі від абонентської станції до базової на основі моделі COST-231 Hata для середнього міста при параметрах (2.41) у випадку 1 та 2 частотних каналів у стільнику:

$$L(R) = 48,55 + 35,4 \lg(1842,5) - 13,82 \lg(50) - (1,1 \lg(1842,5) - 0,7)1,8 + (44,9 - 6,55 \lg(50)) \lg R \quad (2.46)$$

Тепер розглянемо другу з нерівностей (2.19) для випадку 1 та 2 частотних каналів у стільнику:

$$L = 48,55 + 35,4 \lg(1747,5) - 13,82 \lg(50) - (1,1 \lg(1747,5) - 0,7)1,8 + (44,9 - 6,55 \lg(50)) \lg R \leq 157 \Leftrightarrow (44,9 - 6,55 \lg(50)) \lg R \leq 157 - 48,55 - 35,4 \lg(1747,5) + 13,82 \lg(50) + (1,1 \lg(1747,5) - 0,7)1,8 \quad (2.47)$$

Порахуємо, що:

$$157 - 48,55 - 35,4 \lg(1747,5) + 13,82 \lg(50) + (1,1 \lg(1747,5) - 0,7)1,8 \approx 22,31 \quad (2.48)$$

Використовуючи значення (2.43), запишемо:

$$33,77 \lg R \leq 22,31 \Rightarrow \lg R \leq 0,66 \Rightarrow R \leq 10^{0,66} \Rightarrow R \leq 4,59 \text{ км} \quad (2.49)$$

Вираз (2.49) є вирішенням нерівності (2.46), проілюструємо це також графічно на рис. 2.5:

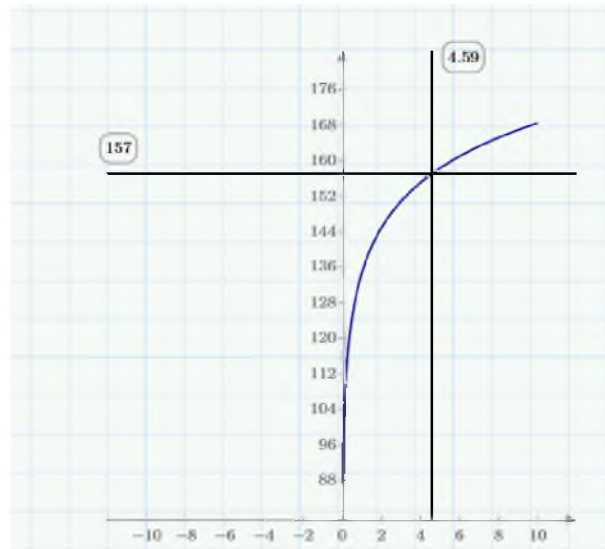


Рисунок 2.5 – До розв'язання нерівності на максимально можливі втрати на трасі від базової станції до абонентської у випадку 1 і 2 частотних каналів у стільнику для моделі COST-231 Hata

На рис. 2.5 зображено залежність втрат на трасі від базової станції до абонентської на основі моделі COST-231 Hata для середнього міста при параметрах (2.41) у випадку 1 та 2 частотних каналів у стільнику:

$$L(R) = 48,55 + 35,4 \lg(1747,5) - 13,82 \lg(50) - (1,1 \lg(1747,5) - 0,7)1,8 + (44,9 - 6,55 \lg(50)) \lg R \quad (2.50)$$

Тож при випадку 1 та 2 частотних каналів у стільнику система нерівностей (2.19) набуває вигляду:

$$\begin{cases} R \leq 5,90 \text{ км} \\ R \leq 4,59 \text{ км} \end{cases} \leftarrow R \leq 3,09 \text{ км}, \quad (2.51)$$

Отже, при обраних параметрах максимальний радіус стільника для випадку 1 та 2 частотних каналів у стільнику буде дорівнювати:

$$R_{max}^{(1,2)} = 4,59 \text{ км} \quad (2.52)$$

Далі розглянемо випадок, коли у стільника 3 та 4 частотних канали. Перша із нерівностей (2.23), як доведено вище, буде правдива як для випадку 1 та 2, так і для випадку 3 та 4 частотних каналів, отже, нам необхідно буде розглянути другу нерівність. То ж отримаємо нерівність:

$$L = 48,55 + 35,4 \lg(1842,5) - 13,82 \lg(50) - (1,1 \lg(1842,5) - 0,7)1,8 + (44,9 - 6,55 \lg(50)) \lg R \leq 158,472 \Leftrightarrow (44,9 - 6,55 \lg(50)) \lg R \leq 158,472 - 48,55 - 35,4 \lg(1842,5) + 13,82 \lg(50) + (1,1 \lg(1842,5) - 0,7)1,8 \quad (2.53)$$

Порахуємо, що:

$$158,472 - 48,55 - 35,4 \lg(1842,5) + 13,82 \lg(50) + (1,1 \lg(1842,5) - 0,7)1,8 \approx 23,01 \quad (2.54)$$

Використовуючи значення (2.43), отримаємо, що:

$$33,77 \lg R \leq 23,01 \Rightarrow \lg R \leq 0,68 \Rightarrow R \leq 10^{0,68} \Rightarrow R \leq 4,78 \text{ км} \quad (2.55)$$

Вираз (2.55) є вирішенням нерівності (2.53), проілюструємо це графічно на рис. 2.6:



Рисунок 2.6 – До розв'язання нерівності на максимально можливі втрати на трасі від базової станції до абонентської у випадку 3 і 4 частотних каналів у стільнику для моделі COST-231 Hata

На рис. 2.6 зображено відповідну залежність втрат від відстані між станціями. Тож приходимо до висновку, що система нерівностей (2.26) перетворюється на:

$$\begin{cases} R \leq 4,78 \text{ км} \\ R \leq 4,59 \text{ км} \end{cases} \Leftrightarrow R \leq 4,59 \text{ км}, \quad (2.56)$$

Тож у випадку 3 і 4 частотних каналів у стільнику для моделі COST-231 Ната для обраних параметрів максимальний радіус стільника дорівнює:

$$R_{max}^{(3,4)} = 4,59 \text{ км} \quad (2.57)$$

Отже, для обраних параметрів у моделі максимальний радіус стільника як при випадку 1 та 2 частотних каналів, так і при випадку 3 та 4 частотних каналів дорівнює 4,59 км.

2.2.3 Розрахунок максимального радіуса стільника для моделі Уолфіша–Ікегамі

Як можна побачити з пункту [1.1.3], для даної моделі, окрім відстані між АС та БС, параметрами ще є висота антени базової станції над дахами будівель Δh_t , середня відстань між будівлями b , середня ширина вулиці w , різниця висот дахів будівель та антени абонентської станції Δh_r , та кут орієнтації вулиці φ , причому між параметрами w та b частіше за все виконується співвідношення (1.29).

Далі для розрахунків ми виберемо наступні значення цих параметрів, що не будуть суперечити обмеженням даної моделі:

$$\begin{aligned} \Delta h_t &= 50\text{м} - 3\text{м} \cdot 5 = 35\text{м}, \Delta h_r = 5 \cdot 3\text{м} - 1,8 = 13,2\text{м}, \\ w &= 2\text{м} + 2\text{м} + 4,5\text{м} + 4,5\text{м} = 13\text{м}, b = 2w = 26\text{м} \end{aligned} \quad (2.58)$$

Далі опишемо більш детально вибір параметрів (2.58). Будемо далі вважати, що для розміщення БС побудовано було вишки висотою 50 м. У даній роботі, ми розглядаємо район середнього міста, забудований п'ятиповерховими будинками, висота одного поверху де дорівнює 3 м. Вважаємо, що людина тримає мобільний телефон на висоті свого зросту (1,8 м). Ширину вулиці обрано з наступних інтуїтивних міркувань – 2 полоси по 4,5 м кожна та два

пішохідні тротуари по 2 м кожен. Параметр b обрано згідно формули (1.29). Для простоти у даній роботі обмежимося лише цими параметрами.

Далі виберемо значення кута φ . Згідно рис. 1.1, втрати збільшуються зі збільшенням кута, але досягнувши максимального значення при $\varphi = 55^\circ$, вони йдуть на спад. Тому далі ми для дослідження виберемо наступні параметри – два граничних кути (0° та 90°) та кут 55° , оскільки при ньому ми маємо максимальні втрати.

Аналітичне розв'язання систем нерівностей (2.19) та (2.23) для даної моделі є доволі громіздким, тому у даній роботі ми далі обмежимося числовими розв'язками, які були зроблені за допомогою математичного пакету Mathcad 15. Повний текст обчислень наведено у додатку В.

Для початку розглянемо випадок, де $\varphi = 0^\circ$ та ми маємо 1 та 2 частотних канали у стільнику. За допомогою формул (1.31), (1.32) побудуємо залежність втрат від відстані для частоти 1747,5 МГц, див. рис. 2.7. У пакеті Mathcad 15 отримано, що розв'язком першої з нерівностей (2.19) для $\varphi = 0$ є:

$$R \leq 7,55 \text{ км}, \quad (2.59)$$

див. рис. 2.7, тобто бачимо, що у випадку, коли вулиця орієнтована так само, як і напрям розповсюдження сигналу, навіть для непрямої видимості втрати є незначними.

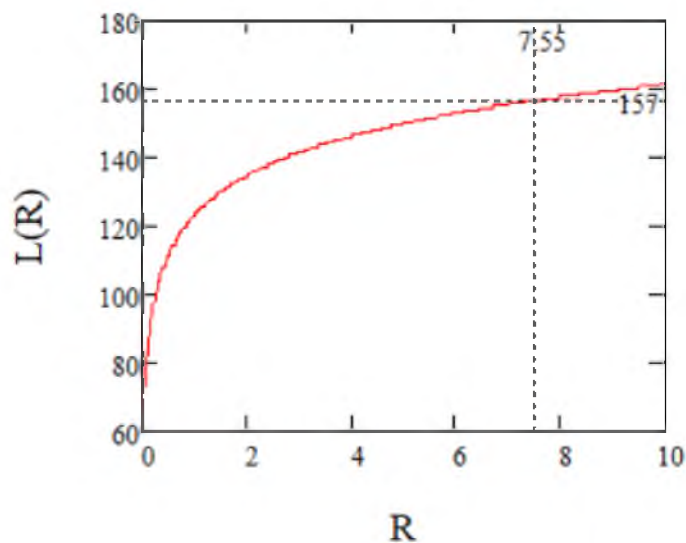


Рисунок 2.7 – залежність втрат від відстані між станціями для траси від абонентської станції до базової для моделі Уолфіша–Ікегамі при куті орієнтації вулиці 0° та параметрах (2.58)

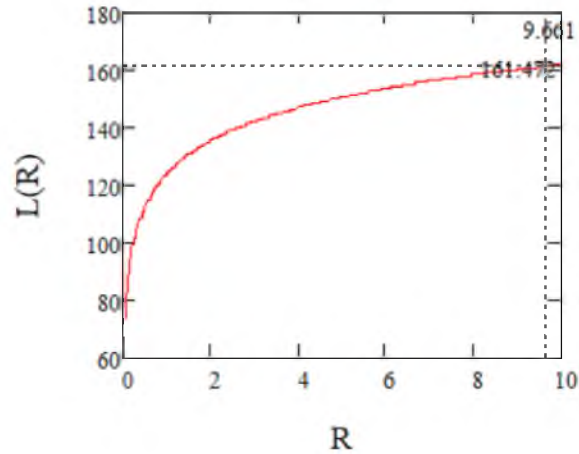


Рисунок 2.8 – До розв’язання другої нерівності з (2.19) для моделі Уолфіша– Ікегамі при куті орієнтації вулиці 0° та параметрах (2.58) для 1 і 2 частотних каналів у стільнику

На основі формул (1.31), (1.32) побудуємо залежність втрат від відстані для частоти 1842,5 МГц, див. рис. 2.8. За допомогою математичного пакету Mathcad 15 отримано, що розв’язком другої з нерівностей (2.19) для $\varphi = 0^\circ$ є:

$$R \leq 9,661 \text{ км}, \quad (2.60)$$

Отже, проаналізувавши (2.59) та (2.60), приходимо до висновку, що для випадку 1 та 2 частотних каналів у стільнику при $\varphi = 0^\circ$ та обраних нами раніше параметрах максимальний радіус стільника буде дорівнювати:

$$R_{max}^{y0,12} = 7,55 \text{ км}, \quad (2.61)$$

Оскільки перші нерівності у системах (2.19) та (2.23) є однаковими для обох випадків як для 1 та 2 частотних каналів, так і для 3 та 4, то далі ми детально розглянемо лише другу нерівність (2.23) для випадку 3 та 4 частотних каналів у стільнику. Залежність втрат від відстані така сама, як і на рис. 2.8, за допомогою Mathcad 15 отримано, що розв’язком другої з нерівностей (2.23) для $\varphi = 0^\circ$ і 3 та 4 каналів у стільнику є:

$$R \leq 8,055 \text{ км}, \quad (2.62)$$

див. рис. 2.9. На основі (2.62) та (2.59) приходимо до висновку, що при обраних параметрах моделі при куті орієнтації вулиці $\varphi = 0^\circ$ для 3 та 4 частотних каналів у стільнику модель Уолфіша–Ікегамі дає наступне значення максимального радіуса стільника:

$$R_{max}^{y0,34} = 7,55 \text{ км}, \quad (2.63)$$

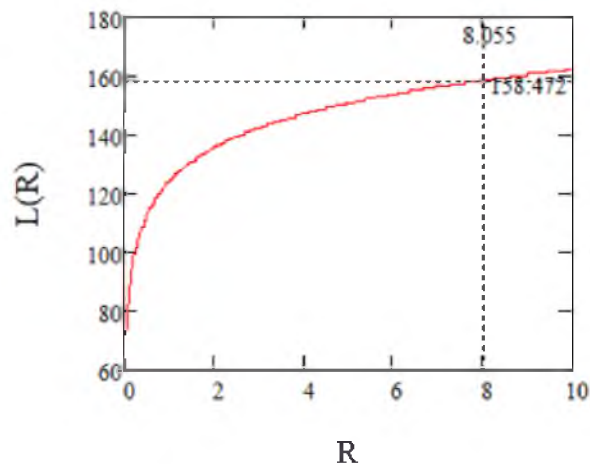


Рисунок 2.9 – До розв’язання другої нерівності з (2.22) для моделі Уолфіша– Ікегамі при куті орієнтації вулиці $\varphi = 0^\circ$ та параметрах (2.58) для 3 і 4 частотних каналів у стільнику.

Розглянемо тепер випадок, коли кут орієнтації вулиці $\varphi = 55^\circ$. Для такого випадку розв’язанням першої нерівності з систем (2.19) та (2.23) буде:

$$R \leq 3,32 \text{ км}, \quad (2.64)$$

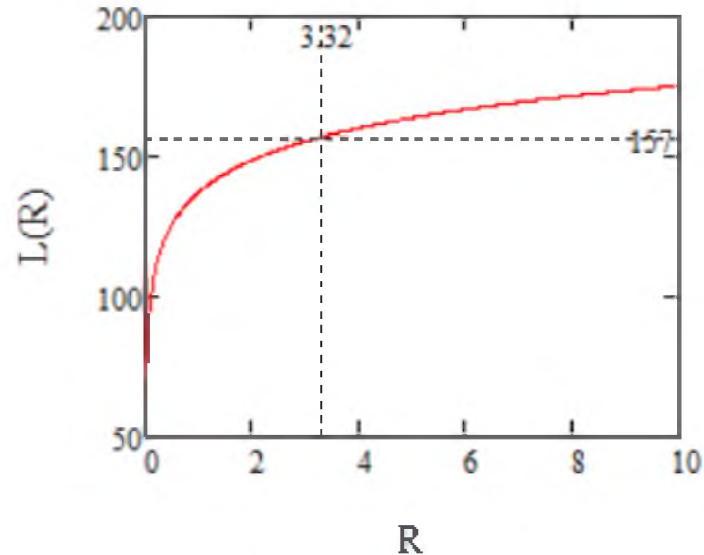


Рисунок 2.10 – До розв’язання першої нерівності з (2.19) та (2.23) для моделі Уолфіша–Ікегамі при куті орієнтації вулиці $\varphi = 55^\circ$ та параметрах (2.58)

Друга нерівність (2.19) у випадку 1 та 2 частотних каналів має розв’язок:

$$R \leq 4,136 \text{ км}, \quad (2.65)$$

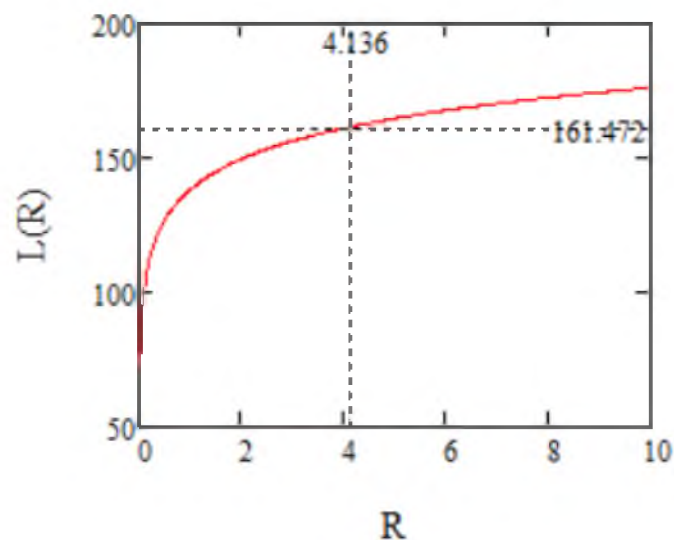


Рисунок 2.11 – До розв’язання другої нерівності з (2.19) для моделі Уолфіша–Ікегамі при куті орієнтації вулиці $\varphi = 55^\circ$ та параметрах (2.58)

Отже, враховуючи результати (2.64) та (2.65), приходимо до висновку, що для випадку 1 та 2 частотних каналів у стільнику при $\varphi = 55^\circ$ та обраних нами раніше параметрах максимальний радіус стільника буде дорівнювати:

$$R_{max}^{y55,12} = 3,32 \text{ км}, \quad (2.66)$$

Для випадку 3 і 4 частотних каналів у стільнику друга нерівність у (2.23) має розв'язок:

$$R \leq 3,49 \text{ км}, \quad (2.67)$$

Проілюструємо це графічно (див. рис. 2.12):

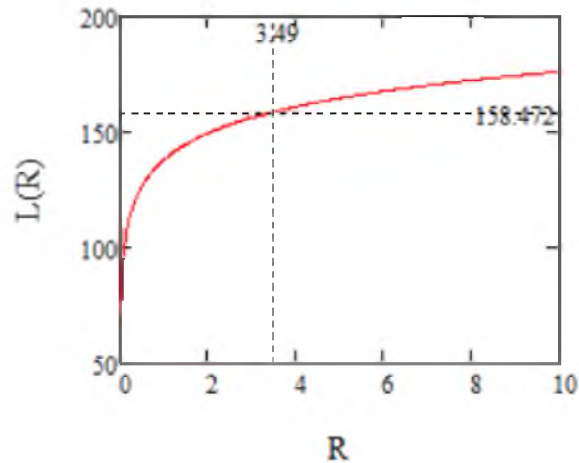


Рисунок 2.12 – До розв'язання другої нерівності з (2.22) для моделі Уолфіша–Ікегамі при куті орієнтації вулиці $\varphi = 55^\circ$ та параметрах (2.58)

Для 3 і 4 частотних каналів у стільнику відповідний максимальний радіус:

$$R_{max}^{y55,12} = 3,32 \text{ км}, \quad (2.68)$$

Розглянемо тепер випадок, коли $\varphi = 90^\circ$. Нерівність, що описує допустимі втрати для траси від абонентської станції до базової (перша з нерівностей 2.19 та 2.22), у такому випадку має розв'язок (див. рис. 2.13):

$$R \leq 4,229 \text{ км}, \quad (2.69)$$

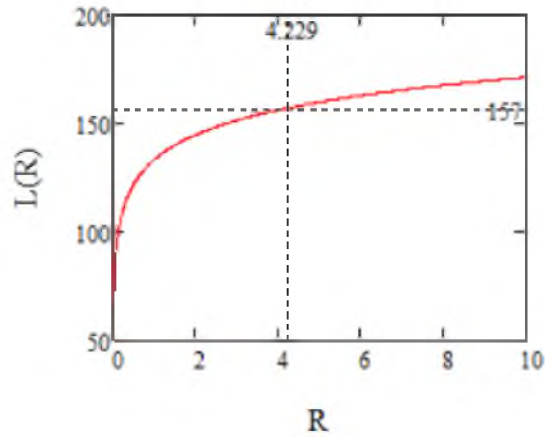


Рисунок 2.13 – До розв’язання першої нерівності з (2.19) та (2.22) для моделі Уолфіша–Ікегамі при куті орієнтації вулиці $\varphi = 90^\circ$ та параметрах (2.58)

Для випадку 1 та 2 частотних каналів у стільнику друга нерівність з (2.19) має розв’язок:

$$R \leq 5,267 \text{ км}, \quad (2.70)$$

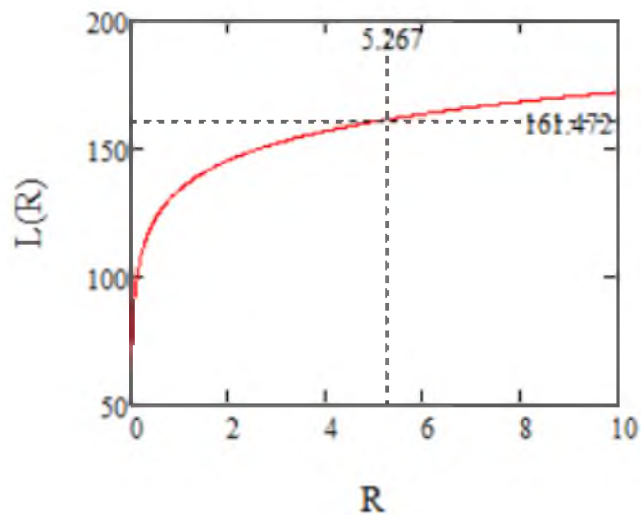


Рисунок 2.14 – До розв’язання другої нерівності з (2.19) для моделі Уолфіша–Ікегамі при куті орієнтації вулиці $\varphi = 90^\circ$ та параметрах (2.58)

Отже, максимальний радіус стільника при куті орієнтації вулиці $\varphi = 90^\circ$ у випадку 1 та 2 частотних каналів у стільнику буде дорівнювати:

$$R_{max}^{y90,12} = 4,229 \text{ км}, \quad (2.71)$$

У випадку 3 і 4 частотних каналів у стільнику друга нерівність у (2.23) має розв'язок (див. рис. 2.15):

$$R \leq 4,392 \text{ км}, \quad (2.72)$$

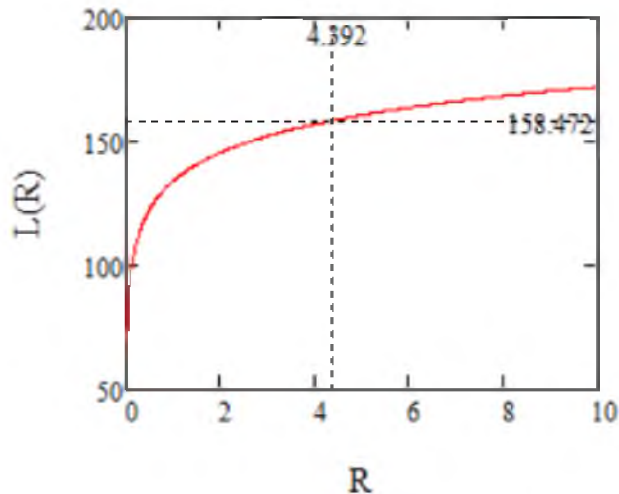


Рисунок 2.15 – До розв'язання другої нерівності з (2.23) для моделі Уолфіша–Ікегамі при куті орієнтації вулиці $\varphi = 90^\circ$ та параметрах (2.58)

Отже, для випадку 3 та 4 частотних каналів у стільнику при куті орієнтації вулиці $\varphi = 90^\circ$ максимальний радіус стільнику буде дорівнювати:

$$R_{max}^{y90,34} = 4,229 \text{ км}, \quad (2.73)$$

2.2.4 Підсумкова таблиця максимальних радіусів стільників для різних моделей

У пунктах 2.2.1-2.2.3 нами було отримано дуже багато результатів для максимальних радіусів стільників, тому для зручності ми зведемо усі отримані нами значення в одну таблицю (див. Таблиця 2.1):

Таблиця 2.1 – Результати для максимальних радіусів стільників у різних моделях

	1 або 2 частотні канали у стільнику	3 або 4 частотні канали у стільнику
Багатопроменева модель	$R_{max} = 5,75 \text{ км}$	$R_{max} = 5,75 \text{ км}$

Продовження таблиці 2.1

Модель COST-231 Hata при параметрах (2.40)	$R_{max} = 4,59$ км	$R_{max} = 4,59$ км
Модель Уолфіша-Ікегамі) при параметрах (2.58), $\varphi = 0^\circ$	$R_{max} = 7,55$ км	$R_{max} = 7,55$ км
Модель Уолфіша-Ікегамі) при параметрах (2.58), $\varphi = 55^\circ$	$R_{max} = 3,32$ км	$R_{max} = 3,32$ км
Модель Уолфіша-Ікегамі) при параметрах (2.58), $\varphi = 90^\circ$	$R_{max} = 4,229$ км	$R_{max} = 4,229$ км

У наступному розділі будуть побудовані можливих площ в залежності від населення району, для яких можлива побудова стільникової мережі стандарту GSM–1800 на основі даних з таблиці 2.1.

2.3 Побудова графіків, що ілюструють можливість побудови мережі в залежності від населення та площі району

Метою даного підрозділу є побудова графіків, що ілюструють можливість побудови стільникової мережі стандарту GSM–1800 для рівномірно забудованого району середнього міста в залежності від населення району та його площі.

Нехай ми маємо відповідний район з заданою кількістю населення. За формулою Ерланга нам необхідно розрахувати кількість абонентів у стільнику, а далі за цими даними визначити кількість стільників у нашій мережі. Оскільки наш радіус може змінювати від 0,5 км до значення R_{max} , то за даними для радіуса треба обчислити діапазон можливих значень площі одного стільника, а потім

знаючи кількість стільників у районі обчислити діапазон можливих значень для площі району.

За даними [5] при одному частотному каналі у стільнику ми маємо 7 каналів трафіку для стандарту GSM-1800. Згідно з цього, за формулою Ерланга (для системи масового обслуговування з відмовами) для того, щоб ймовірність відмови не перевищувала 2%, трафік у стільнику має не перевищувати 2,935 Ерл [5]. Прийmemo трафік на одного абонента у час пік рівним $2,5 \cdot 10^{-2}$ Ерл [12], отже:

$$N_1 = \left[\frac{2,935 \text{ Ерл}}{2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ерл}} \right] = 117, \quad (2.74)$$

де N_1 – число абонентів у одному стільнику мережі стандарту GSM–1800 з одним частотним каналом у стільнику, квадратні дужки позначають цілу частину від числа.

Для випадку двох частотних каналів у стільнику число каналів трафіку дорівнює 14 [5], а максимально допустимий трафік за формулою Ерланга буде дорівнювати 8,2 Ерл. Тоді число абонентів в одному стільнику N_2 буде дорівнювати:

$$N_2 = \left[\frac{8,2 \text{ Ерл}}{2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ерл}} \right] = 328, \quad (2.75)$$

У випадку трьох частотних каналів у стільнику число каналів трафіку дорівнює 22 [5], а максимально допустимий трафік за формулою Ерланга – 21,04 Ерл. Тоді число абонентів в одному стільнику N_3 буде дорівнювати:

$$N_3 = \left[\frac{14,9 \text{ Ерл}}{2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ерл}} \right] = 596, \quad (2.76)$$

Згідно з [5] число каналів трафіку для випадку чотирьох частотних каналів у стільнику буде дорівнювати 29, а максимально допустимий трафік за формулою Ерланга – 21,04 Ерл. Аналогічно з минулими випадками розрахуємо число абонентів в одному стільнику N_4 :

$$N_4 = \left[\frac{21,04 \text{ Ерл}}{2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ерл}} \right] = 841, \quad (2.77)$$

Нехай населення району дорівнює N , тоді кількість стільників у районі для випадку мережі з одним частотним каналом у стільнику згідно (2.74):

$$N_{ст1} = \left[\frac{N}{117} \right] \quad (2.78)$$

Аналогічно розрахуємо кількість стільників у районі для випадку з двома частотними каналами у стільнику:

$$N_{ст2} = \left[\frac{N}{328} \right] \quad (2.79)$$

Для випадку трьох частотних каналів буде кількість стільників така:

$$N_{ст3} = \left[\frac{N}{596} \right] \quad (2.80)$$

Аналогічно розрахуємо для випадку чотирьох частотних каналів у стільнику:

$$N_{ст4} = \left[\frac{N}{841} \right] \quad (2.81)$$

Оскільки ми вважаємо, що район, що розглядається у даній роботі, є рівномірно забудованим, то стільники можна вважати правильними шестикутниками. Площа правильного шестикутника розраховується за наступною формулою:

$$S = \frac{3\sqrt{3}}{2} R^2 \quad (2.82)$$

тому для кожної з моделей площа одного стільника лежить у діапазоні:

$$\frac{3\sqrt{3}}{2} (0,5 \text{ км})^2 \leq S \leq \frac{3\sqrt{3}}{2} R_{max}^2 \quad (2.83)$$

Порахуємо, що:

$$\frac{3\sqrt{3}}{2} (0,5 \text{ км})^2 \approx 0,65 \text{ км}^2 \quad (2.84)$$

Тому з урахуванням (2.84) перепишемо нерівність (2.83) у наступному вигляді:

$$0,65 \text{ км}^2 \leq S \leq \frac{3\sqrt{3}}{2} R_{max}^2 \quad (2.85)$$

Значення R_{max} для різних моделей наведено у таблиці 2.1, відповідно, мінімальна площа стільника є однаковою для всіх моделей, та пов'язана з обмеженням знизу на радіус стільника, що пов'язано з хендоверами [5]. Відповідно, площа району лежить у межах:

$$N_{ст} \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S \leq N_{ст} \cdot \frac{3\sqrt{3}}{2} R_{max}^2 \quad (2.86)$$

де $N_{ст}$ – кількість стільників на районі.

Використовуючи формули (2.78)-(2.81) та дані з таблиці 2.1, ми можемо побудувати таблиці в яких вказано діапазон можливих значень площі району S_p в залежності від населення району N , див. таблиці 2.2 – 2.5.

Таблиця 2.2 – Діапазони можливих значень площі району S_p від в залежності від населення району N для одного частотного каналу у стільнику:

Багатопроменева модель	$\left[\frac{N}{117} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{ст} \cdot 85,9 \text{ км}^2$
Модель COST-231 Ната при параметрах (2.40)	$\left[\frac{N}{117} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{ст} \cdot 54,73 \text{ км}^2$
Модель Уолфіша-Ікегамі) при параметрах (2.58), $\varphi = 0^\circ$	$\left[\frac{N}{117} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{ст} \cdot 148,1 \text{ км}^2$
Модель Уолфіша-Ікегамі) при параметрах (2.58), $\varphi = 55^\circ$	$\left[\frac{N}{117} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{ст} \cdot 28,63 \text{ км}^2$
Модель Уолфіша-Ікегамі) при параметрах (2.58), $\varphi = 90^\circ$	$\left[\frac{N}{117} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{ст} \cdot 46,5 \text{ км}^2$

Таблиця 2.3 – Діапазони можливих значень площі району S_p від в залежності від населення району N для двох частотних каналів у стільнику:

Багатопроменева модель	$\left[\frac{N}{328} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{\text{ст}} \cdot 85,9 \text{ км}^2$
Модель COST-231 Ната при параметрах (2.40)	$\left[\frac{N}{328} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{\text{ст}} \cdot 54,73 \text{ км}^2$
Модель Уолфіша-Ікегамі) при параметрах (2.58), $\varphi = 0^\circ$	$\left[\frac{N}{328} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{\text{ст}} \cdot 148,1 \text{ км}^2$
Модель Уолфіша-Ікегамі) при параметрах (2.58), $\varphi = 55^\circ$	$\left[\frac{N}{328} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{\text{ст}} \cdot 28,63 \text{ км}^2$
Модель Уолфіша-Ікегамі) при параметрах (2.58), $\varphi = 90^\circ$	$\left[\frac{N}{328} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{\text{ст}} \cdot 46,5 \text{ км}^2$

Таблиця 2.4 – Діапазони можливих значень площі району S_p від в залежності від населення району N для трьох частотних каналів у стільнику:

Багатопроменева модель	$\left[\frac{N}{596} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{\text{ст}} \cdot 85,9 \text{ км}^2$
Модель COST-231 Ната при параметрах (2.40)	$\left[\frac{N}{596} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{\text{ст}} \cdot 54,73 \text{ км}^2$
Модель Уолфіша-Ікегамі) при параметрах (2.58), $\varphi = 0^\circ$	$\left[\frac{N}{596} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{\text{ст}} \cdot 148,1 \text{ км}^2$

Продовження таблиці 2.4

Модель Уолфіша-Ікегамі) при параметрах (2.58), $\varphi = 55^\circ$	$\left[\frac{N}{596} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{\text{ст}} \cdot 28,63 \text{ км}^2$
Модель Уолфіша-Ікегамі) при параметрах (2.58), $\varphi = 90^\circ$	$\left[\frac{N}{596} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{\text{ст}} \cdot 46,5 \text{ км}^2$

Таблиця 2.5 – Діапазони можливих значень площі району S_p від в залежності від населення району N для чотирьох частотних каналів у стільнику:

Багатопроменева модель	$\left[\frac{N}{841} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{\text{ст}} \cdot 85,9 \text{ км}^2$
Модель COST-231 Ната при параметрах (2.40)	$\left[\frac{N}{841} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{\text{ст}} \cdot 54,73 \text{ км}^2$
Модель Уолфіша-Ікегамі) при параметрах (2.58), $\varphi = 0^\circ$	$\left[\frac{N}{841} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{\text{ст}} \cdot 148,1 \text{ км}^2$
Модель Уолфіша-Ікегамі) при параметрах (2.58), $\varphi = 55^\circ$	$\left[\frac{N}{841} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{\text{ст}} \cdot 28,63 \text{ км}^2$
Модель Уолфіша-Ікегамі) при параметрах (2.58), $\varphi = 90^\circ$	$\left[\frac{N}{841} \right] \cdot 0,65 \text{ км}^2 \leq S$ $\leq N_{\text{ст}} \cdot 46,5 \text{ км}^2$

Перед тим, як побудувати відповідні графіки, проаналізуємо отримані величини у таблицях 2.2–2.5. Оцінимо за порядком величини, яку густину населення описують максимально можливі площі. Найбільша з таких густин населення досягається для 4 каналів у стільнику для моделі Уолфіша-Ікегамі при $\varphi = 55^\circ$ - це приблизно 841 людина на $28,63 \text{ км}^2$ (приблизно 31 людина на

1 км²). На практиці така густина населення не може описувати місто. Інші обмеження зверху описують ще менші густини населення. Тому маємо досить важливий висновок – обмеження зверху на площу району, виписані у таблицях 2.2–2.5 виконуються автоматично, вони не можуть бути реальними обмеженнями через замалу густину населення.

Отже, можна зробити важливий висновок – *реальні обмеження зверху не діють, а діють знизу*. Тому для того, щоб проілюструвати отримані нами результати графічно, буде достатньо побудувати графіки лише для обмежень знизу для таблиць 2.2-2.5.

Оскільки мережу стандарту GSM-1800 неможливо побудувати, якщо густина населення є більшою за граничну, тож ми оцінимо за порядком граничні величини густини населення. Для мережі з одним частотним каналом у стільнику така густина дорівнює 117 людей на 0,65 км², це приблизно 180 людей на 1 км². Для мережі з двома частотними каналами – 328 людей на 0,65 км², або 505 людей на 1 км². Для мережі з трьома частотними каналами – 596 людей на 0,65 км², або 917 людей на 1 км². Для мережі з чотирма частотними каналами – 841 людина на 0,65 км², або 1294 на 1 км². Зазвичай, в містах середня густина населення складає від 1,5 до 3,5 тис. людей на 1 км², тому ми можемо зробити висновок, що тільки мережі з 3 та 3 частотними каналами у стільнику можна побудувати для не дуже густонаселених районів середмістя.

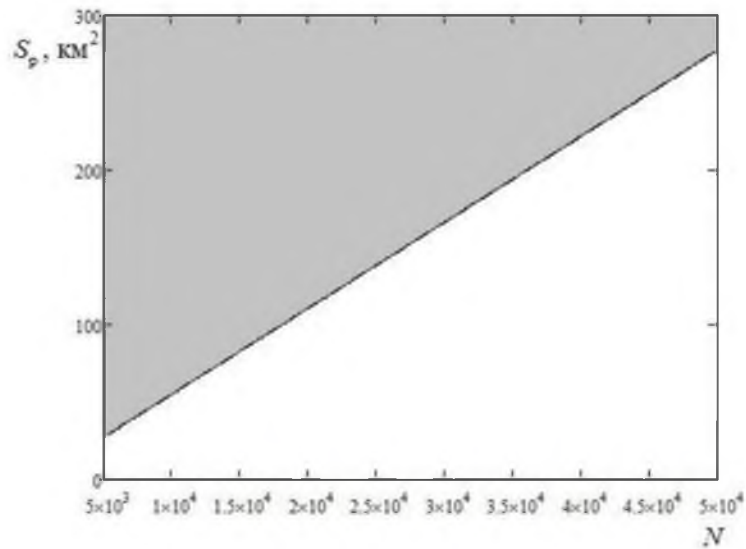


Рисунок 2.16 – області параметрів N та S_p , для яких можливо побудувати мережу з одним частотним каналом у стільнику.

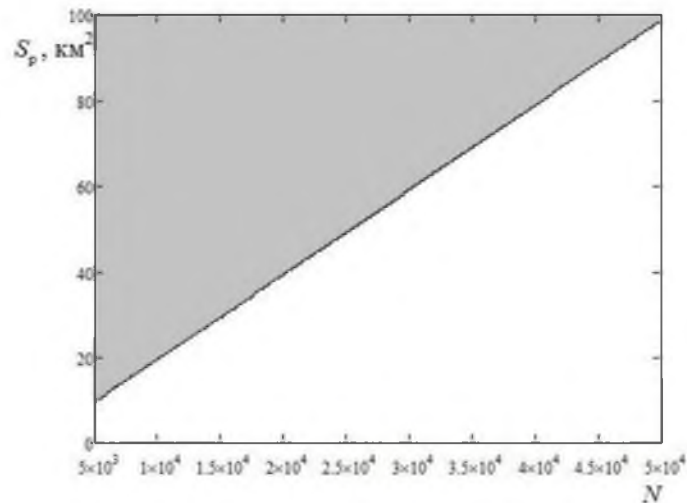


Рисунок 2.17 – області параметрів N та S_p , для яких можливо побудувати мережу з двома частотними каналами у стільнику.

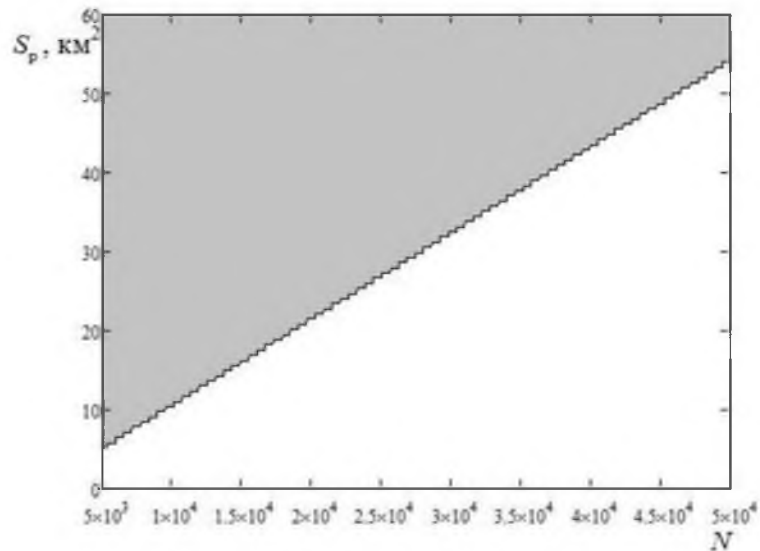


Рисунок 2.18 – області параметрів N та S_p , для яких можливо побудувати мережу з трьома частотними каналами у стільнику.

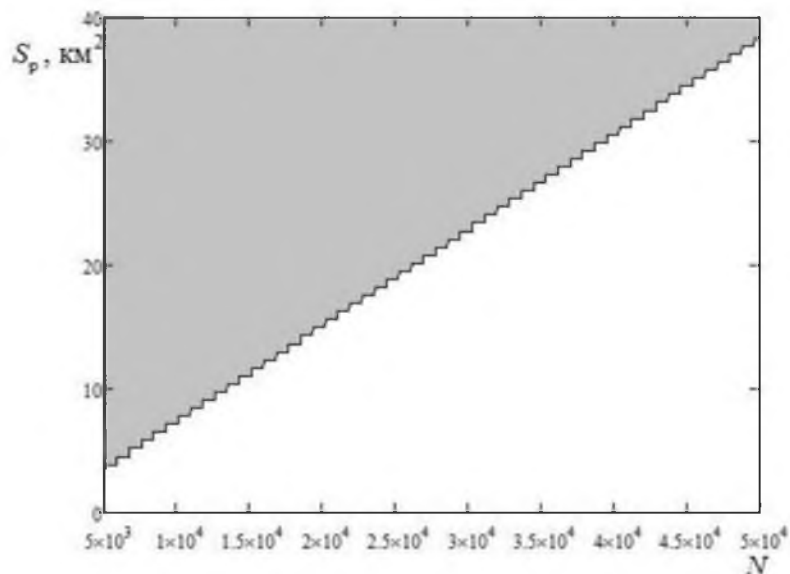


Рисунок 2.19 – області параметрів N та S_p , для яких можливо побудувати мережу з чотирма частотними каналами у стільнику.

2.4 Висновки

У спеціальній частині даної кваліфікаційної роботи ми розглядали стільникову мережу стандарту GSM-1800 для району середнього міста із рівномірною забудовою.

Для початку ми отримали нерівності (2.19) та (2.23), що описують максимально допустимі втрати на трасі між абонентською та базовими станціями. Система нерівностей (2.19) є справедливою для випадку 1 та 2 частотних каналів у стільнику, а система (2.23) – для 3 та 4 частотних каналів у стільнику.

Далі ми розрахували максимально можливий радіус стільнику на основі наступних моделей: багатопроменева модель, модель COST-231 Hata, модель Уолфіша-Ікегамі. Для моделі COST-231 Hata було обрано параметри (2.41), а для моделі Уолфіша-Ікегамі – (2.58). Результати розрахунків було внесено у таблицю 2.1.

Отримані результати для багатопроменевої моделі та моделі COST-231 Hata є допустимими параметрами для даних моделей. Щодо моделі Уолфіша-Ікегамі при значенні $\varphi = 0^\circ$ максимальний радіус стільника є більшим ніж 5 км. Але даний розбіг не є проблемою для побудови мережі, оскільки даний результат означає, що максимальний радіус стільника для моделі Уолфіша-Ікегамі є більшим за 5 км. Також площа одного стільника радіуса 5 км приблизно дорівнює 65 км² (див. (2.82)), що навіть для 4 частотних каналів у стільнику дає густину населення приблизно 13 людей на 1 км², що вже не може описувати місто, а так як максимальний радіус є більшим за 5 км, то все одно нерівність зверху на радіус стільника для моделі Уолфіша-Ікегамі виконується автоматично.

Після цього за допомогою формули Ерланга нами було розраховано кількість абонентів у стільнику для мережі стандарту GSM-1800. На основі отриманих результатів (див. (2.74)-(2.77)) ми порахували у випадках від 1 до 4 частотних каналів у стільнику. діапазони можливих площ району в залежності від населення району, що дають змогу побудувати мережу стандарту GSM-900 у цьому районі, дані результати зведено у таблиці 2.2 – 2.5.

Ми отримали, що для мережі з одним частотним каналом у стільнику така густина дорівнює 117 людей на 0,65 км², це приблизно 180 людей на 1 км². Для

мережі з двома частотними каналами – 328 людей на $0,65 \text{ км}^2$, або 505 людей на 1 км^2 . Для мережі з трьома частотними каналами – 596 людей на $0,65 \text{ км}^2$, або 917 людей на 1 км^2 . Для мережі з чотирма частотними каналами – 841 людина на $0,65 \text{ км}^2$, або 1294 на 1 км^2 . Оскільки верхні обмеження стосовно площі району описують дуже малу густину населення (яка практично неможлива у реальному випадку), то ми можемо зробити висновок, що верхні обмеження працюють автоматично, тобто за умовчанням. Реальним обмеженням при побудові мережі є обмеження знизу, яке пов'язане з кількістю допустимих хендоверів. Побудовано відповідні графіки (див. рис. 2.15 – 2.19), на яких сірим виділено область параметрів, для якої побудова стільникової мережі є можливою, а білим – ні.

Зауважимо, що отримані нами результати у даному розділі є оціночними, тобто для нас важливі не конкретні значення, а більш важливим є порядок величин, оскільки ціллю є довести реальність даного проекту. Середня густина населення у містах зазвичай становить від 1,5 до 3,5 тис. людей на 1 км^2 , тому проаналізувавши отримані нами результати, ми можемо зробити висновок, що дана побудова мережі з 3 та 4 частотними каналами у стільнику є реальною.

3 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Техніко-економічне обґрунтування

Задля вирішення нашого завдання з передмістям - стільникова мережа GSM-1800 є найвигіднішим варіантом з усіх можливих, так як вона проста у виготовленні та дешева, якщо порівнювати її з аналогами і так як, очевидно в передмісті відсутні високі будівлі, які можуть заважати сигналу, вона може покрити всю зону без великих витрат.

3.2 Вибір обладнання

Базова станція Huawei DBS3900 може працювати одночасно в двох різних режимах, такі як: режим GSM та режим UMTS. Ця базова станція працює за допомогою IP транспорту, що є дуже важливою характеристикою для базової станції. Так само DBS3900 підтримує можливість працювати обладнання через мережу 4-го покоління, LTE.

Базова станція DBS3900 складається з трьох частин:

- 1 BBU– це основна частина БС, яка обробляє поступаючу інформацію
- 2 RRU– це передавачі TRx.
- 3 Антена (штирьова всенаправлена).

Контролер базових станцій є одним з найважливіших елементів мережі стільникового зв'язку GSM і UMTS. Один 69-ий контролер може працювати в цілих трьох режимах, такі як: GSM, як UMTS, як GSM / UMTS і може обслуговувати до 7-8 БС.

Мобільний центр комутації MSC для мережі GSM-R - важливе рішення як для компанії Huawei, так і для мереж мобільного зв'язку GSM-R. Він містить MSC-сервер і медіашлюзи MGW, які підтримують стандартні інтерфейси і всі послуги, які працюють у специфікаціях EIRENE (European integrated railway radio enhanced network). Основною перевагою цього мобільного центру - являється те,

що він може взаємодіяти з пристроями інших виробників, наприклад, з центром диспетчеризації.

Маршрутизатори Quidway серії AR 46 – це високопродуктивні маршрутизатори для телекомунікаційних провайдерів і мереж підприємств. Також, як відомо, ці маршрутизатори можуть виконувати декілька задач, і працювати як магістральні маршрутизатори або високопродуктивні маршрутизатори в мережах підприємств.

У маршрутизаторах Quidway AR 46 використовуються швидкодійний мікропроцесор PowerPC і універсальна платформа маршрутизації (VRP). Дані маршрутизатори дозволяють користувачам мережі мати доступ до різних протоколів канального рівня. Ці маршрутизатори також мають змогу підтримувати багатоадресну маршрутизацію, різноманітні типи VPN (включаючи VPN L2TP, GRE, IPSec і MPLS), передачу голосу і послуги DDR.

GSM шлюз ATEUS EASYGATE FAX. Порт FXS Прийом і передача аналогових факсимільних повідомлень GPRS-сервіс Режим передачі даних, прийом і посилка SMS Функція FSK Підключення зовнішнього пристрою.

3.3 Капітальні витрати

Витрати на установку та підтримання працездатності стільникової мережі зазначено у таблиці 3.1:

Таблиця 3.1 – Витрати на устаткування

Назва устаткування	Кількість одиниць	Вартість грн.	Загальна вартість
Базова станція (повний комплект)	50	7546	377300
Маршрутизатор	1	1345	1345
GSM шлюз	10	1789	17890
Мобільний центр комутації MSC	5	8307	41535

Продовження таблиці 3.1

Контролер базових станцій	1	9476	9476
Всього			447546

Витрати на установку вишок базової станції на місцевості наведено в таблиці 3.2:

Таблиця 3.2 – Витрати на монтаж

Посада	Кіл-сть чоловік	Ставка грн/год	Кіл-сть годин	Зар. плата	Соц. відрахування 36,5%
Прораб	4	40	90	14400	5256
Інженер	2	63	90	11340	4139
Різноробочий	20	24	90	43200	15768
Водій будівельної техніки	5	34	40	6800	2482
Кранівник	2	39	38	2964	1081
Сума	33			78704	14526
Всього					93230

Капітальні витрати розраховуємо за формулою 3.1:

$$K = K_{ус} + K_{тр} + K_{мн}, \quad (3.1)$$

де $K_{ус}$ – вартість устаткування базової станції, грн.; $K_{тр}$ – транспортні витрати, грн.; $K_{мн}$ – витрати на установку, грн.

$$K = 447546 + 22377 + 93230 = 563153 \text{ грн.} \quad (3.2)$$

Таблиця 3.3 – Капітальні витрати

Назва витрат	Вартість, грн
Вартість устаткування	447546
Транспортні витрати (5% від вартості устаткування)	22377
Витрати на монтаж	93230
Всього	563153

3.4 Експлуатаційні витрати

Експлуатаційні витрати – це витрати, які йдуть на експлуатацію та обслуговування базової станції за рік. Загальна сума витрат при експлоатації розраховується за формулою 3.2:

$$Z = C_a + C_z + C_c + C_{ел} + C_{ін} + C_m, \quad (3.3)$$

де C_a – амортизаційні відрахування; C_z – заробітна плата персоналу, яка працює при встановленні базової станції; C_c – соціальні відрахування; C_m – витрати на технічне обслуговування; $C_{ел}$ – вартість електроенергії, яка потребує базова станція; $C_{ін}$ - інші витрати.

Оскільки, виходячи з наших розрахунків - даний вид обладнання входить до другої амортизаційної групи, термін експлуатації якого складає близько 5 років. Розрахуємо прямолінійним методом:

$$C_a = \frac{447546}{5} = 89509 \text{ грн./рік} \quad (3.4)$$

Перелік необхідного персоналу, який потрібен для обслуговування стільникової мережі приведено в таблиці 3.4:

Таблиця 3.4 – Заробітна плата персоналу за місяць

Посада	Кількість чоловік	Середня зарплатня грн	Всього зарплатня грн
Інженер	5	13100	65500
Монтер	2	9305	18610
Оператор	10	7300	73000
Всього	17		157110

Розраховуємо заробітну плату персоналу за рік:

$$C_z = 157110 \times 12 = 1885320 \text{ грн.} \quad (3.5)$$

Відрахування на соціальні заходи складають 36,5% від заробітної плати на рік:

$$C_c = 1885320 \times 0.365 = 688141 \text{ грн.} \quad (3.6)$$

Витрати на технічне обслуговування даного виду техніки складають 1% на рік:

$$C_T = 447546 \times 0.01 = 4475 \text{ грн.} \quad (3.7)$$

Вартість електроенергії, що споживає стільникова мережа за рік:

$$C_{елек} = WBN \times 8760, \quad (3.8)$$

де W – споживана потужність устаткування (кВт/год.); B – вартість одного кВт енергії (1,68 грн.); N – кількість одиниць устаткування.

$$C_{елек} = 1 \times 8 \times 1.68 \times 8760 = 117734 \text{ грн.} \quad (3.9)$$

Інші витрати на установку, обслуговування стальникової мережі складають 4% від річної заробітної плати робітників:

$$C_{ини} = 1885320 \times 0.04 = 75413 \text{ грн.} \quad (3.10)$$

Відповідно з цього ми після наших розрахунків маємо, що розрахована вище сума експлуатаційних витрат за рік буде складати:

$$З = 88600 + 1885320 + 688141 + 4430 + 117734 + 75413 = 2859638 \text{ грн.} \quad (3.11)$$

Експлуатаційні витрати за рік наведено в табл. 3.5

Таблиця 3.5 – Експлуатаційні витрати

Стаття затрат	Сума затрат, тис. грн.
Амортизація	89509
Заробітна плата	1885320
Соціальні відрахування	688141
Витрати на технічне обслуговування	4475
Вартість електроенергії	117734
Інші витрати	75413
Всього	2859638

3.5 Висновки

Під час виконання даного економічного розділу нашого проекту ми успішно розрахували капітальні витрати на побудову мережі зв'язку, вони в

нашому випадку складають 563153 грн. Крім того, нами було розраховано експлуатаційні витрати на обслуговування стільникової мережі за рік. Ці витрати згідно з нашими розрахунками складають 2859638 грн.

ВИСНОВКИ

В даній роботі розглянуто мережі стандарту GSM-1800 для району середнього міста із рівномірною забудовою. Оскільки нами розглядається саме рівномірна забудова, то надалі ми можемо вважати стільники правильними шестикутниками. На практиці з хорошою точністю район з однотипною забудовою без великих площ та парків можна вважати рівномірно забудованим.

В теоретичній частині роботи було оглянуто емпіричні моделі для розрахунку втрат потужності на трасі між абонентською та базовою станціями. Для простоти у роботі було описано три моделі, які можуть бути застосовані для мережі стандарту GSM-1800, а саме – багатопроменева модель, модель COST-231 Hata та модель Уолфіша Ікегамі.

У спеціальній частині роботи для початку ми отримали системи нерівностей для розрахунку втрат потужності на трасі від абонентської та базової станції і навпаки, дані нерівності були виведені за допомогою відомих нам даних стосовно стандарту GSM-1800 [5]. Далі були нами розраховані максимальні радіуси стільників для кожної із вищевказаних моделей для випадків 1 або 2 та 3 або 4 частотних каналів у стільнику. Для моделі COST-231 Hata та багатопроменевої моделі усі розрахунки були проведені аналітично та детально описані у спеціальній частині проекту, щодо моделі Уолфіша-Ікегамі – розрахунки є цілком реальними, але дуже громіздкими, то ж їх було виконано за допомогою математичного пакету Mathcad 15, див. додаток В. Також за допомогою даного пакету було побудовано графіки, які наведені у спеціальній частині.

Для розрахунку нами було обрано параметри (2.41) та (2.58). У даному проекті ми розглядаємо випадок у районі середнього міста з висотою базових станцій 50м та висотою абонентських станцій 1,8м, оскільки висоту абонентської станції ми беремо як зріст людини. Розглянуто район, забудований п'ятиповерховими будинками висотою 15 м (висоту одного поверху оцінено як

3 м), середня ширина вулиці прийнята рівною 13м, а середня відстань між центрами будівель – 26 м. Модель Уолфіша–Ікегамі розглянута лише у випадку непрямої видимості. Так як розглянуто досить високі вишки (50 м), то фактично мова йде про дослідження принципової можливості побудови мережі у районі. Звичайно, також цікавим є питання – а що тоді у випадку, коли висота базової станції менша за 50 м? Але це вже окремо дослідження для окремої роботи, у даній кваліфікаційній роботі нас можливі обмеження по можливому радіусу зверху.

Отримані результати максимальних радіусів стільників було занесено у таблицю 2.1. Треба зазначити, що отримані результати для багатопроменевої моделі та моделі COST-231 Hata є допустимими параметрами для даних моделей. Щодо моделі Уолфіша-Ікегамі при значенні $\varphi = 0^\circ$ максимальний радіус стільника є більшим ніж 5 км. Але даний розбіг не є проблемою для побудови мережі, оскільки даний результат означає, що максимальний радіус стільника для моделі Уолфіша–Ікегамі є більшим за 5 км, просто робимо висновок, що для неї максимальний радіус стільника перевищує 5 км.

Далі на основі формули Ерланга оцінено кількість абонентів у стільнику. На основі цих оцінок отримано діапазони площ району в залежності від населення даного району, для яких є можливою побудова стільникової мережі стандарту GSM–1800 у даному районі. По отриманим нами розрахункам видно, що верхні обмеження стосовно площі району описують дуже малу густину населення (яка практично неможлива у реальному випадку), то ми можемо зробити висновок, що верхні обмеження працюють автоматично, тобто за умовчанням. Реальними обмеженням при побудові мережі є обмеження знизу, яке пов'язане з кількістю допустимих хендоверів. Побудовано відповідні графіки (див. рис. 2.15 – 2.19), на яких сірим виділено область параметрів, для якої побудова стільникової мережі є можливою, а білим – ні.

Нами було отримано оціночні величини густини населення району: для випадку одного частотного каналу у стільнику – не більше 180 людей на 1 км²,

для двох частотних каналів у стільнику – не більше 505 людей на 1 км², для випадку трьох частотних каналів у стільнику – не більше 917 людей на 1 км², для випадку чотирьох частотних каналів у стільнику – не більше 1294 людей на 1 км². Оскільки, як вказано вище, дані значення є оціночними, нам більше важливі не конкретні значення даних величин, а – їхній порядок. Побудовано відповідні графіки, що ілюструють можливість побудови мережі для району з відповідним населенням та площею (сірі зони описують область параметрів, для яких можлива побудова мережі, див. рис. 2.15 – 2.19). Середня густина населення у містах зазвичай становить від 1,5 до 3,5 тис. людей на 1 км², тому проаналізувавши отримані нами результати, ми можемо зробити висновок, що дана побудова мережі з 3 та 4 частотними каналами у стільнику є реальною.

У економічному розділі роботи успішно розраховано капітальні витрати на побудову мережі зв'язку, вони в нашому випадку складають 563153 грн. Крім того, було розраховано експлуатаційні витрати на обслуговування стільникової мережі за рік. Ці витрати згідно з нашими розрахунками складають 2859638 грн. Даний проект може бути успішно застосований при проектуванні мережі на практиці.

Результати роботи можуть бути враховані при плануванні стільникових мереж у рівномірно забудованих районах середніх міст.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 GSM World Coverage Map and GSM Country List [Electronic resource].
Online: <https://www.worldtimezone.com/gsm.html>
- 2 Н.Н. Буснюк, Г.И. Мельянец. «Системы мобильной связи», Белорусский государственный технический университет, Минск, 2018, 154 с.
- 3 Характеристики стандарта GSM [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://afu.com.ua/gsm/harakteristiki-standarta>
- 4 В.И. Попов, В.А. Скуднов, А.С. Васильев. Математические модели и алгоритмы распространения радиоволн в сотовых сетях мобильной связи. – Евразийский союз ученых, №. 3-3, 2016. – с. 68–80.
- 5 Г.В. Колодезная. Основы теории связи с подвижными объектами: метод. пособие по курсовому проектированию. – Хабаровск, ДВГУПС, 2012. – 26 с.
- 6 Joseph Isabona, C. C. Konyeha. Urban Area Path loss Propagation Prediction and Optimization Using Hata Model at 800 MHz, IOSR Journal of Applied Physics, Volume 3, Issue 4, pp. 08–18.
- 7 Masoud Dao Hamid. Measurement Based Statistical Model for Path Loss Prediction for Relaying Systems Operating in 1900 MHz Band: A dissertation submitted to the College of Engineering at Florida Institute of Technology in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Melbourne, Florida, 2014. – 179 p.
- 8 Julie C. Ogbulezie, Nsed A. Akonjom, Sunday A. Ojomu, A.O. Ezugwu, I. E. Igajah. A Review of Path Loss Models for UHF Radio Waves Propagation: Trends and Assessment, International Journal of Research in Engineering and Science, Vol. 4, Issue 7, 2016, pp. 67-75.
- 9 В.А. Утц Исследование потерь при распространении радиосигнала сотовой связи на основе статистических моделей. – Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки, Вып. 5, 2011. – с. 44–49. 70

10 Edilberto O. Rozal, Evaldo G. Pelaes. Statistical Adjustment of Walfisch-Ikegami Model based in Urban Propagation Measurements, Proceedings of 2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC 2007), pp. 584–588

11 Moe Rahnema. “UMTS Network Planning, Optimization, and InterOperation with GSM”, IEEE, John Wiley and sons (Asia) Pte Ltd, Singapore, 2008, 349p.

12 Бабков В.Ю., Вознюк М.А., Михайлов П.А. «Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование», М., Горячая линия – Телеком, 2013, 220с

ДОДАТОК А. Відомість матеріалів дипломного проекту

№	Формат	Найменування	Кількість листків	Примітки
<i>Документація</i>				
1	A4	Реферат	3	
2	A4	Список умовних скорочень	1	
3	A4	Зміст	2	
4	A4	Вступ	2	
5	A4	Стан питання. Постановка задачі.	26	
6	A4	Спеціальна частина	24	
7	A4	Економічний розділ	6	
8	A4	Висновки	2	
9	A4	Перелік посилань	2	
10	A4	Додаток А	1	
11	A4	Додаток Б	1	
12	A4	Додаток В	1	
13	A4	Додаток Г	1	

ДОДАТОК Б. Перелік документів на оптичному носії

- | | | | | |
|---|--|--------|------------------|-----------|
| 1 | Електронна | версія | пояснювальної | записки |
| | (ПояснювальнаЗапискаКондратьєва.doc
ПояснювальнаЗапискаКондратьєва.pdf) | | | та |
| 2 | Електронна | версія | демонстраційного | матеріалу |
| | (ПрезентаціяКондратьєва.pdf) | | | |

ДОДАТОК В. Обчислення у Mathcad для моделі Уолфіша-Ікегамі

$$\Delta ht := 50 - 15$$

$$\Delta ht = 35$$

$$w := 9 + 2 + 2 = 13$$

$$\Delta hr := 15 - 1.8 = 13.2$$

$$b := 2w = 26$$

$$\text{Lori}(\varphi) := \begin{cases} -10 + 0.354\varphi & \text{if } (\varphi \geq 0) \wedge (\varphi < 35) \\ [2.5 + 0.075(\varphi - 35)] & \text{if } (\varphi \geq 35) \wedge (\varphi < 55) \\ [4 - 0.114(\varphi - 55)] & \text{if } (\varphi \geq 55) \wedge (\varphi \leq 90) \end{cases}$$

$$L0(R, F) := -32.45 - 20 \log(F) - 20 \log(R)$$

$$\text{Lrts}(\varphi, F) := 16.9 + 10 \log(w) - 10 \log(F) - 20 \log(\Delta hr) - \text{Lori}(\varphi)$$

$$\text{Lbsh} := -18 \log(1 + \Delta ht)$$

$$ka := 54$$

$$kd := 18$$

$$kf(F) := -4 + 0.7 \left(-1 + \frac{F}{925} \right)$$

$$\text{Lmsd}(R, F) := -\text{Lbsh} - ka - kd \cdot \log(R) - kf(F) \cdot \log(F) + 9 \log(b)$$

$$\text{Lrt}(R, \varphi, F) := \begin{cases} (L0(R, F) + \text{Lrts}(\varphi, F) + \text{Lmsd}(R, F)) & \text{if } (\text{Lrts}(\varphi, F) + \text{Lmsd}(R, F)) < 0 \\ L0(R, F) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$L_loss(R, \varphi, F) := -\text{Lrt}(R, \varphi, F) + 6.8$$

$$y := 6$$

$$\text{root}(L_loss(y, 0, 1747.5) - 157, y) = 7.755$$

$$\text{root}(L_loss(y, 55, 1747.5) - 157, y) = 3.32$$

$$\text{root}(L_loss(y, 90, 1747.5) - 157, y) = 4.229$$

$$\text{root}(L_loss(y, 0, 1842.5) - 161.472, y) = 9.661$$

$$\text{root}(L_loss(y, 55, 1842.5) - 161.472, y) = 4.136$$

$$\text{root}(L_loss(y, 90, 1842.5) - 161.472, y) = 5.267$$

$$\text{root}(L_loss(y, 0, 1842.5) - 158.472, y) = 8.055$$

$$\text{root}(L_loss(y, 55, 1842.5) - 158.472, y) = 3.449$$

$$\text{root}(L_loss(y, 90, 1842.5) - 158.472, y) = 4.392$$

ДОДАТОК Д. Відгук керівника дипломного проекту

ВІДГУК

Відгук на кваліфікаційну роботу

студентки групи 172-21м-1 Кондратьєвої Ю. А.

**на тему: «Дослідження застосування найпростішої стільникової мережі
стандарту GSM-1800 в передмісті»**