


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

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних  
локальних та мобільних мережах»

Виконав: студент 2-го курсу,  
групи ТКС-21м  
спеціальності 172 – Телекомунікації та  
радіотехніка

  
\_\_\_\_\_ Кошлай В.Д.

Керівник: к.т.н., доцент каф. ІКСТ  
\_\_\_\_\_ Васильківський М. В.  
« 16 » \_\_\_\_\_ 12 2022 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС  
\_\_\_\_\_ Осадчук В.С.  
« 16 » \_\_\_\_\_ 12 2022 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

\_\_\_\_\_ д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 16 » \_\_\_\_\_ 12 2022 р.

Вінниця ВНТУ – 2022 рік

Інницький національний технічний університет  
 Факультет інформаційних електронних систем  
 кафедра інфокомунікаційних систем і технологій  
 рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
 спеціальність - 17– Електроніка та телекомунікації  
 (шифр і назва)


спеціальність - 172 – Телекомунікації та радіотехніка  
 (шифр і назва)

освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ІКСТ**

**д.т.н., професор В.М. Кичак**

 "14" 09 2022 року

## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кошляю Володимир Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи Дослідження несанціонованого доступу до радіотракту в  
безпроводних локальних та мобільних мережах  
 керівник роботи Васильківський Микола Володимирович, канд. техн. наук,  
доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "14" 09 2022 року № 203

Строк подання студентом роботи 12 грудня 2022 року

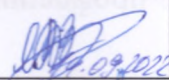

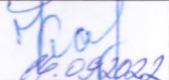

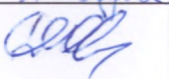
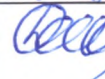
Вихідні дані до роботи: тип системи передавання – 4G, 5G, Wi-Fi; кількість  
аналізів передачі BSSM LTE – 4; ширина пропускання BSSM LTE – 80МГц;  
діапазон частот Wi-Fi – 2,45ГГц і 5ГГц; діапазон неліцензованої смуги частот –  
800МГц

Зміст текстової частини: Вступ. Методи доступу до спільного каналу в  
бездротових локальних та стільникових мережах. Дослідження методу доступу до  
загального каналу із використанням резервуючого сигналу. Дослідження методу  
доступу до загального каналу без використання резервуючого сигналу. Метод  
розв'язу колізій для базових станцій стільникових мереж. Економічна частина.  
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список  
використаних джерел. Додатки.

Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):  
Приклад роботи реалізації методу доступу LBT без сигналу; Приклад реалізації  
методу доступу LBT з резервуючим сигналом; Приклад асиметричної колізії при  
використанні реалізації методу LBT з резервуючим сигналом; Приріст сумарної  
пропускнуої спроможності обох мереж при використанні методу доступу до  
загального каналу з використанням резервуючого сигналу і рівній кількості  
СБЛМ та BSSM; Вразливий інтервал при використанні реалізації механізму LBT  
без сигналу; Максимальний приріст пропускнуої спроможності BSSM при  
використанні методу доступу до загального каналу без використання  
резервуючого сигналу; Приріст пропускнуої спроможності, отриманий під час  
використання МДК порівняно з базовим підходом у сценарії 1; Сумарна

пропускна здатність обох мереж у сценарії 2; Приріст пропускної спроможності стільникової мережі у сценарії 3.

#### 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	к.т.н., доцент Васильківський М. В.	 14.09.2022	 16.12.2022
Економічна частина	доцент каф. ЕПВМ к.е.н., Кавецький В.В.	 14.09.2022	 16.12.2022
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	професор кафедри БЖДПБ, доцент, д.п.н., Дембіцька С.В.	 14.09.2022	 16.12.2022

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2022 року

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2022- 07.09.2022
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2022-13.09.2022
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка завдання на МКР.	14.10.2022-27.09.2022
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі.	28.09.2022-10.10.2022
5.	Математичне моделювання.	11.10.2022-13.11.2022
6.	Аналіз економічної ефективності розробки.	14.11.2022-20.11.2022
7.	Охорона праці та безпека життєдіяльності.	21.11.2022-25.11.2022
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	26.11.2022-01.12.2022
9.	Нормоконтроль МКР.	02.12.2022-09.12.2022
10.	Попередній захист МКР, опонування МКР.	12.12.2022
11.	Захист МКР ЕК .	19.12.2022

Студент

  
(підпис)

Кошлай В.Д.

Керівник роботи

  
(підпис)

Васильківський М. В.

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.391

Кошлай В.Д. Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка, освітня програма - телекомунікації. Вінниця: ВНТУ, 2022. 169 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 71 назва; рис.: 32; табл. 30.

Метою магістерської дипломної роботи є підвищення ефективності методів випадкового доступу в стільникових мережах при спільному існуванні з бездротовими локальними мережами в загальному каналі неліцензованого частотного діапазону. Був проведений огляд літературних джерел щодо несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах. Проведений аналіз сучасного стану методів доступу до неліцензованого каналу. Проведено порівняльний аналіз методів доступу до неліцензованого каналу в стільникових мережах за допомогою аналітичного моделювання. Розроблено метод дозволу колізій для БССМ, що дозволяє виявляти та дозволяти колізії передач СБЛМ і БССМ, знизивши тим самим негативний вплив колізій на ефективність роботи бездротових локальних та стільникових мереж. Розроблено аналітичну модель роботи мережі, що використовує запропонований метод дозволу колізій.

Графічна частина складається з 9 плакатів із результатами модельних та досліджень. Також у магістерській кваліфікаційній роботі проведено розрахунки економічної частини та розділу охорони праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: LTE, Wi-Fi, неліцензований канал, резервуючий сигнал, пропускна здатність.

## ABSTRACT

UDC 621.391

Koshlai V.D. Investigation of unauthorized access to the radio tract in wireless local and mobile networks. Master's qualification thesis on specialty 172 - telecommunications and radio engineering, educational program - telecommunications. Vinnytsia: VNTU, 2022. 169 p.

In Ukrainian speech Bibliography: 71 titles; Fig.: 32; table 30.

The goal of the master's thesis is to improve the efficiency of random access methods in cellular networks when they coexist with wireless local networks in the common channel of an unlicensed frequency range. A review of literature sources on unauthorized access to the radio path in wireless local and mobile networks was conducted. An analysis of the current state of access methods to an unlicensed channel was carried out. A comparative analysis of access methods to an unlicensed channel in cellular networks was carried out using analytical modeling. A collision resolution method for BSSM has been developed, which allows detecting and allowing collisions of SBLM and BSSM transmissions, thereby reducing the negative impact of collisions on the efficiency of wireless local and cellular networks. An analytical model of network operation using the proposed collision resolution method has been developed.

The graphic part consists of 9 posters with model and research results. Also, calculations of the economic part and the section on labor protection and safety in emergency situations were carried out in the master's qualification work.

Keywords: LTE, Wi-Fi, unlicensed channel, backup signal, bandwidth.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП .....	10
1 МЕТОДИ ДОСТУПУ ДО СПІЛЬНОГО КАНАЛУ В БЕЗДРОТОВИХ ЛОКАЛЬНИХ ТА СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖАХ. ....	14
1.1 Проблеми роботи в неліцензованих частотних діапазонах .....	14
1.2 Технології стільникових мереж, що працюють у неліцензованого діапазоні 5 ГГц .....	16
1.3 Порівняння методів доступу до неліцензованого каналу в бездротових локальних та стільникових мережах .....	19
1.3.1 Метод доступу до каналу в бездротових локальних мережах Wi-Fi.....	19
1.3.2 Методи доступу до каналу в стільникових мережах.....	21
1.4 Про ефективність методів доступу до загального каналу .....	25
1.5 Проблема асиметричних колізій.....	28
1.6 Огляд літератури та постановка завдань магістерської дипломної роботи .....	29
1.6.1 Дослідження методів доступу до неліцензованого каналу в стільникових мережах .....	29
1.6.2 Методи виявлення та дозволу колізій у бездротових мережах з методом доступу до каналу CSMA .....	33
1.7 Висновки до розділу 1 .....	37
2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ДОСТУПУ ДО ЗАГАЛЬНОГО КАНАЛУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РЕЗЕРВУЮЧОГО СИГНАЛУ .....	39
2.1 Аналітична модель .....	40
2.1.1 Припущення, що використовуються.....	40
2.1.2 Опис моделі .....	41
2.2 Чисельні результати.....	45
2.3 Висновки до розділу 2 .....	48
3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ДОСТУПУ ДО ЗАГАЛЬНОГО КАНАЛУ БЕЗ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗЕРВУЮЧОГО СИГНАЛУ .....	50

3.1 Базова аналітична модель.....	52
3.1.1 Припущення моделі .....	52
3.1.2 Опис моделі .....	52
3.1.3 Чисельні результати.....	64
3.2 Врахування неідеальності механізму прослуховування середовища .....	69
3.2.1 Припущення моделі .....	69
3.2.2 Опис моделі .....	70
3.2.3 Чисельні результати.....	76
3.3 Висновки до розділу 3 .....	84
4 МЕТОД ДОЗВОЛУ КОЛІЗІЙ ДЛЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ.....	86
4.1 Опис запропонованого методу .....	86
4.2 Оцінка ймовірності дозволу колізії.....	89
4.3 Аналітична модель .....	91
4.3.1 Припущення моделі .....	91
4.3.2 Опис моделі .....	92
4.4 Чисельні результати.....	96
4.4.1 Аналіз ймовірності дозволу колізії при використанні МДК .....	96
4.4.2 Аналіз впливу МДК на пропускну спроможність бездротових локальних та стільникових мереж.....	102
4.5 Висновки до розділу 4 .....	108
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....	110
5.1 Оцінювання наукового ефекту .....	110
5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	113
5.2.1 Витрати на оплату праці.....	114
5.2.2 Відрахування на соціальні заходи .....	117
5.2.3 Сировина та матеріали.....	117
5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	118
5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт .....	119
5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт ....	120

5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень .....	121
5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей .....	122
5.2.9 Службові відрядження.....	124
5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	124
5.2.11 Інші витрати.....	125
5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	125
5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи .....	126
5.4 Висновок до розділу 5 .....	128
<b>6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ...</b>	<b>129</b>
6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання досліджень .....	130
6.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця .....	130
6.1.2 Електробезпека приміщення .....	131
6.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії .....	132
6.2.1 Мікроклімат .....	132
6.2.2 Склад повітря робочої зони.....	133
6.2.3 Виробниче освітлення .....	134
6.2.4 Виробничий шум.....	136
6.2.5 Виробничі випромінювання.....	137
6.2.6 Напруженість праці.....	138
6.3 Основні засади радіаційного захисту.....	144
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>145</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>147</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>158</b>
Додаток А Технічне завдання .....	159
Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень .....	160
Додаток В Приклад роботи реалізації методу доступу LBT без резервуючого сигналу.....	161



Додаток Г Приклад реалізації методу доступу LBT з резервуючим сигналом.....	162
Додаток Д Приклад асиметричної колізії при використанні реалізації методу LBT з резервуючим сигналом.....	163
Додаток Е Приріст сумарної пропускної спроможності обох мереж при використанні методу доступу до загального каналу з використанням резервуючого сигналу і рівній кількості СБЛМ та БССМ .....	164
Додаток Є Вразливий інтервал при використанні реалізації механізму LBT без резервуючого сигналу .....	165
Додаток Ж Максимальний приріст пропускної спроможності БССМ при використанні методу доступу до загального каналу без використання резервуючого сигналу.....	166
Додаток З Приріст пропускної спроможності, отриманий під час використання МДК порівняно з базовим підходом у сценарії 1 .....	167
Додаток И Сумарна пропускна здатність обох мереж у сценарії 2.....	168
Додаток І Приріст пропускної спроможності стільникової мережі у сценарії 3.....	169

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

Ан.м. – аналітична модель

БЛМ – бездротова локальна мережа

БССМ – базова станція стільникової мережі

ДК-слот – слот дозволу колізії

Ім.м. – імітаційна модель

МДК – метод дозволу колізій

СБЛМ – станції бездротової локальної мережі

СМ – стільникова мережа

## ВСТУП

*Актуальність теми дослідження.* Вимоги користувачів до пропускної спроможності стільникових мереж зростають з кожним роком. Сучасні стільникові мережі використовують ліцензовані смуги частот в яких передача дозволена тільки пристроям одного стільникового оператора-власника ліцензії. Незважаючи на ряд переваг такого підходу, у нього є як мінімум один істотний недолік, що перешкоджає подальшому зростанню пропускної спроможності, — обмежена ширина і дороговизна ліцензованих діапазонів частот. У зв'язку з цим одним з найбільш перспективних способів збільшення пропускної спроможності стільникових мереж є використання неліцензованих частот передачі даних.

Для вирішення проблеми дефіциту частотних ресурсів консорціум 3GPP, що займається розробкою специфікацій стільникових мереж LTE, розробив ряд технологій (LTE LAA, LTE-eLAA, NR-U), що дозволяють базовій станції стільникової мережі (БССМ) передавати дані користувачам пристроями в неліцензованому діапазоні 5 ГГц. Одна з головних складнощів роботи в цьому діапазоні полягає в тому, що він уже використовується іншими технологіями зв'язку, зокрема бездротовими локальними мережами, побудованими за технологією Wi-Fi.

І станції бездротової локальної мережі (СБЛМ), і БССМ використовують методи випадкового доступу до каналу, засновані на множинному доступі з прослуховуванням несучої та уникненням колізій (англ. CSMA/CA). Зокрема перед кожною спробою передачі вони виконують процедуру відстрочення. Основна відмінність методів доступу полягає в тому, що СБЛМ завжди може почати передачу даних у момент закінчення процедури відстрочення, в той час як БССМ через протокольні обмеження може почати передачу даних тільки на межі слотів в ліцензованому каналі.

Крім того, у зв'язку з тим, що в стільникових мережах використовуються методи випадкового доступу, колізії передач неминучі, як і зумовлені ними

суттєві втрати каналних ресурсів. На відміну від бездротових локальних мереж, що мають механізм RTS/CTS, специфікації стільникових мереж відсутні будь-які механізми зниження негативного впливу колізій на їх пропускну здатність. Тому актуальними є розробка та аналіз методів детектування та дозволу колізій для БССМ, що дозволяють як підвищити пропускну спроможність стільникових мереж, так і забезпечити справедливий поділ каналних ресурсів між бездротовими локальними та стільниковими мережами.

*Аналіз останніх досліджень.* Випадковий доступ до каналу є глибоко вивченою темою [1, 2], проте дослідження спільного існування бездротових локальних і стільникових мереж в тому самому неліцензованому каналі з урахуванням специфіки відповідних технологій є відкритим завданням. Дослідженням методів випадкового доступу в локальних і стільникових мережах присвячено значну кількість робіт, серед яких слід особливо відзначити роботи наступних вчених: В. Bellalta, G. Bianchi, M. Dohler, L. Kleinrock, I. Tinirello, Q. Chen, M. Cierny, M. Ghosh, T. Henderson, S. Lagen, M. Mehrnouch та ін.

Практично всі роботи, присвячені дослідженню методів доступу стільникових мереж до неліцензованого каналу, використовують припущення про те, що БССМ посилає резервуючий сигнал після закінчення процедури відстрочки [3]. Однак, по-перше, цей підхід призводить до виникнення накладних втрат, оскільки резервуючий сигнал не несе жодних даних користувача. По-друге, специфікація стільникових мереж LTE допускає реалізацію методу доступу БССМ до неліцензованого каналу без резервуючого сигналу, ефективність якої на момент публікації результатів магістерської дипломної роботи мало вивчена. Таким чином, виникає необхідність проведення порівняльного аналізу методів доступу БССМ до неліцензованого каналу і побудови аналітичних моделей, що дозволяють оцінити ефективність аналізованих методів доступу.

*Мета та постановка задачі.* Метою магістерської дипломної роботи є підвищення ефективності методів випадкового доступу в стільникових мережах при спільному існуванні з бездротовими локальними мережами в загальному каналі неліцензованого частотного діапазону.

*Задачами магістерської дипломної роботи є:*

- проведення порівняльного аналізу методів доступу до неліцензованого каналу в стільникових мережах за допомогою аналітичного моделювання.
- розробка методу дозволу колізій для БССМ, що дозволяє виявляти та дозволяти колізії передач СБЛМ і БССМ, знизивши тим самим негативний вплив колізій на ефективність роботи бездротових локальних та стільникових мереж.
- розробка аналітичної моделі роботи мережі, що використовує запропонований метод дозволу колізій, яка дозволить оцінити ймовірність дозволу колізії та знайти пропускні можливості бездротової локальної та стільникової мереж.

*Методи дослідження.* У магістерській кваліфікаційній роботі використовуються методи теорії телекомунікаційних мереж, теорії ймовірностей, теорії випадкових процесів, теорії ланцюгів Маркова, математичного та комбінаторного аналізу. При імітаційному моделюванні використовується середовище імітаційного моделювання ns-3.

*Наукова новизна.* У магістерській кваліфікаційній роботі вперше:

- Проведено порівняльний аналіз методів доступу БССМ до неліцензійного каналу із застосуванням і без застосування резервуючого сигналу, побудовано аналітичні моделі роботи системи з СБЛМ та БССМ, що працюють в одному каналі, що дозволяють порівняти ефективність розглянутих методів доступу.
- Розроблено метод дозволу колізій для БССМ, що дозволяє виявляти та дозволяти колізії передач СБЛМ та БССМ, а також розроблено аналітичну модель, за допомогою якої було показано його високу ефективність.

*Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи.*  
Апробація роботи та її основні результати роботи проводилися на Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2023)» у 2022 році.

# 1 МЕТОДИ ДОСТУПУ ДО СПІЛЬНОГО КАНАЛУ В БЕЗДРотовИХ ЛОКАЛЬНИХ ТА СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖАХ

## 1.1 Проблеми роботи в неліцензованих частотних діапазонах

Останнім часом спостерігається значне зростання обсягу інформації, що передається в стільникових мережах [9]. Це призводить до того, що з кожним роком забезпечити зростаючі вимоги користувачів до пропускної спроможності використовуваних стільникових мереж стає дедалі важче.

Сучасні стільникові мережі, зокрема, мережі LTE (англ. Long-term Evolution) [10], використовують централізоване управління мережею радіодоступу, згідно з яким базова станція стільникової мережі (БССМ) повністю контролює параметри передач усіх підключених до неї пристроїв користувача (включаючи сигнально-кодову конструкцію, час початку та тривалість передачі тощо). Централізоване управління є можливим через те, що традиційно стільникові мережі використовують ліцензовану смугу частот, в якій дозволено передавати тільки пристроям оператора стільникового зв'язку, що володіє ліцензією на роботу в даній смузі.

Використання централізованого управління має ряд переваг, таких як відсутність колізій при передачі різних пристроїв, здатність забезпечити гарантовану якість обслуговування і т.д. Однак у нього є як мінімум один істотний недолік, що перешкоджає збільшенню пропускної спроможності, — обмежена ширина і дороговизна ліцензованих діапазонів частот. Зокрема, хоча специфікація LTE дозволяє БССМ одночасно використовувати для передачі до 32 частотних каналів сумарною шириною до 640 МГц, з економічних причин на практиці в 2018 році оператори стільникового зв'язку обмежуються використанням максимум 4 каналів із сумарною шириною, що не перевищує 80 МГц [11].

Бездротові локальні мережі, побудовані на основі технології Wi-Fi [12–15], що отримали в останні два десятиліття велику популярність, мають зовсім

інший принцип управління мережею радіодоступу, заснований на методі множинного доступу з прослуховуванням несучої та уникненням колізій (англ. CSMA /CA, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Це пов'язано з тим, що бездротові локальні мережі працюють в неліцензованих каналах в діапазонах 2,4 і 5 ГГц, які так само можуть використовуватися іншими мережами передачі даних. Через це метод доступу до каналу для бездротових локальних мереж спочатку розроблявся з урахуванням можливості спільного існування з іншими мережами, що працюють у тому ж каналі, причому необов'язково побудованими за технологією Wi-Fi. Незважаючи на те, що при використанні децентралізованого методу доступу можливі колізії, що знижують його ефективність, він забезпечує можливість спільного існування бездротових локальних мереж, що знаходяться поруч.

В останні роки для вирішення проблеми дефіциту частотних ресурсів у стільникових мережах планується використовувати не тільки ліцензовані, але й неліцензовані смуги частот, в діапазоні 5 ГГц. У цьому діапазоні, залежно від країни, доступні для використання смуги частот сумарною шириною понад 400 МГц. Для роботи на цих частотах не потрібно купувати ліцензію, що дуже вигідно для операторів стільникового зв'язку.

Однак існують і значні труднощі при використанні діапазону 5 ГГц у мережах. По-перше, даний діапазон вже активно використовується бездротовими локальними мережами, побудованими на основі технології Wi-Fi, а також різними радарями. Іншими словами, на відміну від ліцензованого діапазону частот у оператора стільникового зв'язку немає можливості контролювати всі передачі в смузі. Через це метод доступу до неліцензованого смуги повинен враховувати наявність у каналі пристроїв, що працюють за іншою технологією. Крім того, у ряді країн (наприклад, у країнах ЄС, Японії та ін.) існують законодавчі обмеження щодо використання неліцензованого діапазону 5 ГГц [16, 17]. Так, наприклад, у країнах ЄС діють такі обмеження, описані в [18]:



- обов'язкове використання методу доступу до каналу, заснованого на CSMA/CA, а також обмеження значення його параметрів, наприклад, порога детектування зайнятості середовища;
- деякі смуги частот у діапазоні 5 ГГц можна використовувати лише всередині приміщень;
- обмеження на максимально допустиму потужність та тривалість безперервної передачі даних, а також спектральну маску сигналу;
- обов'язкове використання механізму динамічного вибору частотного каналу (англ. Dynamic Frequency Selection, DFS), призначеного, по-перше, для забезпечення рівномірного завантаження частотних каналів, а, по-друге, для переходу на інший частотний канал діапазону 5 ГГц у разі детектування роботи радара [19]. Ця вимога виникла через те, що деякі погодні та військові радари, а також радари цивільної авіації використовують при роботі діапазон 5 ГГц. При використанні DFS пристрій повинен детектувати передачі радара (короткі періодичні імпульси), і після виявлення такої передачі пристрій повинен перейти на інший частотний канал, не зайнятий радаром, і не використовувати попередній канал як мінімум протягом 30 хвилин;
- використання механізму регулювання потужності передачі (англ. Transmit Power Control, TPC) [20], що дозволяє знижувати потужність передачі пристроїв для зменшення інтерференції в щільних мережах.

Для того щоб використовувати неліцензований діапазон 5 ГГц у стільникових мережах був розроблений ряд технологій, про які йтиметься в наступному розділі.

## 1.2 Технології стільникових мереж, що працюють у неліцензованого діапазоні 5 ГГц

Одна з перших спроб використання неліцензованого каналів в діапазоні 5 ГГц в стільникових мережах LTE була здійснена консорціумом LTE-U (англ. LTE-Unlicensed) [21, 22], який розробив однойменну технологію на основі

специфікацій 3GPP версії 12. Ця технологія не стала загальноприйнятим міжнародним стандартом, тому що вона порушує законодавчі обмеження у низці країн, наприклад, у Японії та країнах ЄС [18]. Однак у деяких країнах, де законодавчі обмеження є менш суворими, наприклад, у США, технологія LTE-U може використовуватись.

Після цього консорціум 3GPP, що займається розробкою специфікацій стільникових мереж LTE, в рамках специфікацій версії 13 (англ. 3GPP Release 13) розробив нову технологію, що отримала назву «доступ за допомогою ліцензованого каналу» (англ. LTE License-Assisted Access, LTE-LAA). Метод доступу LBT (англ. Listen-before-Talk, LBT) до неліцензованого каналу, описаний у специфікації LTE-LAA, задовольняє локальним законодавчим обмеженням більшості країн, тому підходить для міжнародного застосування.

При використанні методу доступу LBT БССМ виконує процедуру відстрочення перед кожною спробою передачі. Однак у зв'язку з тим, що специфікація LTE-LAA успадковує структуру кадрів, використовувану LTE в ліцензованих каналах, БССМ може почати передачу тільки на межах слотів в ліцензованому каналі. Процедура відстрочки є випадковою, тому малоімовірно, що вона закінчиться на межі слотів у ліцензованому каналі. Однак специфікація технології LTE-LAA не визначає поведінку БССМ протягом проміжку часу між закінченням процедури відстрочення та наступною межею слотів у ліцензованому каналі.

Якщо БССМ просто чекатиме межу слотів, одна зі станцій бездротової локальної мережі (СБЛМ) може зайняти канал своєю передачею. Щоб уникнути цього ефекту, у багатьох роботах [23–26] пропонується після закінчення процедури посилати так званий резервуючий сигнал (шум) для захисту передачі БССМ. Незважаючи на те, що такий підхід дозволяє підвищити продуктивність БССМ, він має низку недоліків. Наприклад, при використанні резервуючого сигналу можуть відбуватися асиметричні колізії, що призводять до значного погіршення пропускної спроможності СБЛМ, що

працюють у тому ж діапазоні. Більш детально про асиметричні колізії буде розказано далі в розділі 1.3.

Спочатку технологія LTE-LAA дозволяла БССМ вести передачу даних в неліцензованому діапазоні тільки в низхідному каналі, тобто, від базової станції користувача пристрою, проте в специфікаціях 3GPP версій 14 і 15 була додана підтримка передач у висхідному каналі. Нові технології отримала назву LTE-eLAA (англ. enhanced LAA) та LTE-feLAA (англ. further enhanced LAA).

Консорціум 3GPP в даний час продовжує розвивати ідеї LTE-LAA у вигляді нової технології NR-U (англ. New Radio Unlicensed) [27]. Незважаючи на те, що NR-U ще знаходиться у стадії розробки, вона буде включена до специфікації 3GPP версії 16, і її основні нововведення вже відомі. По-перше, на відміну від технології LTE LAA, яка призначена для роботи тільки в неліцензованому діапазоні 5 ГГц, технологія NR-U [28] дозволить базовим станціям використовувати інші діапазони неліцензованих частот, наприклад, 3,5 ГГц, 6 ГГц і 60 ГГц [29-32]. Крім цього, БССМ зможе при необхідності зменшувати тривалість слота в ліцензованому каналі завдяки так званій гнучкій нумерології (англ. flexible numerology). Незважаючи на те, що гнучка нумерологія дозволить знизити накладні витрати, пов'язані з посилюючим резервуючого сигналу, використання меншого розміру слота значно збільшує складність користувальницьких пристроїв [33]. Варто зазначити, що БССМ, які використовують технологію NR-U, продовжать використовувати метод доступу LBT з усіма його перевагами та недоліками.

Так як технологія LTE-U спочатку розроблялася швидше як рішення, що показує принципову можливість використання діапазону 5 ГГц стільниковими мережами, досить швидко компанії, що входять до консорціуму LTE-U, перестали розвивати цю технологію. Зважаючи на це, у цій магістерській дипломній роботі буде розглядатися лише проблеми взаємодії бездротових локальних мереж, побудованих за технологією Wi-Fi, та стільникових мереж, побудованих за технологіями LTE-LAA/NR-U.

Крім того, так як трафік в стільникових мережах істотно асиметричний і більша частина даних передається в низхідному каналі [34], в даній цій магістерській дипломній роботі буде розглядатися тільки передача даних у низхідному каналі стільникових мереж, тобто, від БССМ пристроями користувачів.

### 1.3 Порівняння методів доступу до неліцензованого каналу в бездротових локальних та стільникових мережах

#### 1.3.1 Метод доступу до каналу в бездротових локальних мережах Wi-Fi

Розглянемо докладніше, як метод доступу CSMA/CA реалізований у бездротових локальних мережах, побудованих на основі технології Wi-Fi. Далі будемо дотримуватися термінології, яка використовується у стандарті IEEE 802.11-2016 [14] мереж Wi-Fi.

У сучасних мережах Wi-Fi [15] використовується реалізація методу доступу CSMA/CA під назвою EDCA (Enhanced Distributed Channel Access). При використанні методу доступу EDCA перед здійсненням кожної спроби передачі кадру СБЛМ виконує процедуру відстрочення. Для цього вона спочатку ініціалізує лічильник відстрочки випадковим цілим числом, рівномірно розподіленим на інтервалі  $[0, W - 1]$ , де  $W$  - Це поточне значення конкурентного вікна. Лічильник відстрочки зменшується на одиницю щоразу, коли СБЛМ виявляє канал вільним протягом слота відстрочки тривалістю  $\sigma = 9$  мкс. Інакше, тобто, якщо СБЛМ виявляє, що канал зайнятий, вона заморожує лічильник відстрочки до тих пір, поки канал знову не стане вільним протягом інтервалу *AIF S* (англ. Arbitration Inter-Frame Space).

Як тільки значення лічильника відстрочки досягає нуля, СБЛМ починає спробу передачі кадру даних (або послідовності кадрів даних), тривалість якої з урахуванням передачі кадру-підтвердження не перевищує значення  $T_{XOP}$ . Якщо спроба була успішною, тобто, якщо було отримано кадр-підтвердження,

поточне значення  $W$  конкурентного вікна встановлюється рівним мінімального значення  $W$ . Якщо ж кадру підтвердження не було отримано, то спроба передачі вважається неуспішною, і значення конкурентного вікна стає рівним  $W = \min(2W, Wa)$ , де  $Wa$  — це максимальне значення величини конкурентного вікна.

Значення параметрів EDCA ( $W, Wa, T_{XOP}$ ) встановлюються залежно від того, до якої з категорій доступу (англ. Access category, AC) належить трафік, див. Таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 - Значення параметрів методу доступу EDCA у бездротових локальних мережах, за стандартні дані за стандартом Wi-Fi [14]

Категорія трафіку	Несхідний канал				Східний канал			
	СБЛМ	$Wa$	$AIFS$ , мкс	$T_{XOP}$ , мс	$W$	$Wa$	$AIFS$ , мкс	$T_{XOP}$ , мс
AC_BK	16	1024	79	2,528	16	1024	79	2,528
AC_BE	16	64	43	2,528	16	1024	43	2,528
AC_VI	8	16	25	4,096	8	16	34	4,096
AC_VO	4	8	25	2,08	4	8	34	2,08

При використанні методу доступу EDCA можливі колізії при передачі кадрів, наприклад коли лічильник відстрочки досягає нуля одночасно у двох і більше СБЛМ. Щоб зменшити тривалість колізії, і навіть зменшення впливу проблеми прихованих станцій [35], СБЛМ може використовувати механізм RTS/CTS. За його використання після закінчення процедури відстрочення СБЛМ надсилає короткий службовий кадр RTS (англ. Request to send) одержувачу кадру даних. Отримавши кадр RTS, СБЛМ одержувач відповідає коротким службовим кадром CTS (Clear to send). Передача кадру даних починається лише після отримання кадру CTS. Як результат, використання цього механізму призводить до того, що в колізію можуть потрапляти тільки службові кадри RTS, які мають невелику тривалість, що призводить до

підвищення пропускної здатності бездротової локальної мережі в сценаріях з великою кількістю активних СБЛМ або прихованими СБЛМ.

### 1.3.2 Методи доступу до каналу в стільникових мережах

Перейдемо до розгляду методів доступу до неліцензованого каналу в стільникових мережах.

У всіх згаданих у попередньому розділі технологіях стільникового зв'язку (LTE-U, LTE LAA, NR-U) для передачі в неліцензованому каналі використовується механізм об'єднання несучих (англ. carrier aggregation) [36, 37], який був доданий у специфікації 3GPP у версії 10. Даний механізм дозволяє БССМ передавати дані користувача пристрою одночасно і синхронно в декількох каналах, як ліцензованих, так і неліцензованих. У результаті передача даних БССМ в неліцензованому каналі має строго періодичну структуру, повністю аналогічну ліцензованим каналам, а БССМ може почати передачу даних в неліцензованому каналі тільки на межі слотів в ліцензованому каналі. Зауважимо, що тривалість слотів в ліцензованому каналі в стільникових мережах значно більше слота відстрочки. Наприклад, у стільникових мережах четвертого покоління LTE-LAA тривалість слотів у ліцензованому каналі дорівнює 500 мкс, а тривалість слота відстрочки — всього 9 мкс. Слід зазначити, що СБЛМ не мають подібних обмежень, оскільки кожна передача в бездротовій локальній мережі починається зі спеціального сигналу, званого преамбулою, який може бути легко задетектований СБЛМ-отримувачем.

У мережах LTE-U використовується метод доступу до каналу Carrier-Sensing Adaptive Transmission (CSAT). При використанні CSAT БССМ чергує періоди часу, які називаються ON- та OFF-періодами. Протягом ON-періоду, що має тривалість від 1 до 20 мс, БССМ передає в неліцензованому каналі контрольні та користувальницькі дані аналогічно ліцензованим каналам. На противагу цьому протягом OFF-періоду, що має тривалість від 1 до 160 мс,

БССМ не передає ніякі сигнали в неліцензованому каналі. Для спільного існування з іншими мережами БССМ, що використовує технологію LTE-U, може відстежувати їх активність протягом періоду OFF (сумарно аж до 200 мс) і адаптивно змінювати тривалість кожного з періодів [38].

Реалізація методу доступу CSMA/CA в низхідному каналі стільникових мереж, стандартизованих консорціумом 3GPP (LTE-LAA, LTE-eLAA, LTE-feLAA, NR-U), отримала на звання LBT (англ. Listen before talk). Метод доступу LBT має багато спільного з методом доступу EDCA, однак існує низка значних відмінностей.

Зокрема, аналогічно EDCA, при використанні методу доступу LBT БССМ перед кожною передачею в неліцензованому каналі виконує процедуру відстрочення. Однак, незважаючи на те, що метод доступу LBT визначає 4 аналогічні категорії трафіку, деякі значення параметрів методу доступу суттєво відрізняються, див. Таблицю 1.2. А саме значення параметра  $T_{XOP}$  (у специфікації 3GPP цей параметр має позначення  $T_c$ ), що визначає максимальну тривалість безперервної передачі, у стандарті Wi-Fi не перевищує 4 мс для всіх типів трафіку, в той час як в LTE-LAA для деяких типів воно може досягати 8 мс.

Таблиця 1.2 - Значення параметрів методу доступу LBT у стільникових мережах, задані за замовчуванням у специфікації 3GPP [39]

Категорія трафіку	Несхідний канал				Східний канал			
	$W$	$W_a$	$AIFS$ , мкс	$T_{XOP}$ , мс	$W$	$W_a$	$AIFS$ , мкс	$T_{XOP}$ , мс
АС_ВК	16	1024	79	8	16	1024	79	6
АС_ВЕ	16	64	43	8	16	1024	43	6
АС_ВІ	8	16	25	3	8	16	34	4
АС_ВО	4	8	25	2	4	8	34	2

Крім цього, як вже було згадано, передача даних БССМ може починатися тільки на межі слотів у ліцензованому каналі. Специфікація 3GPP

не визначає поведінку БССМ у разі, якщо процедура відстрочення завершилася не на межі слотів у ліцензованому каналі. Якщо БССМ чекатиме цю межу, інші пристрої (наприклад, СБЛМ) можуть зайняти канал у цей час, див. рис. 1.1.

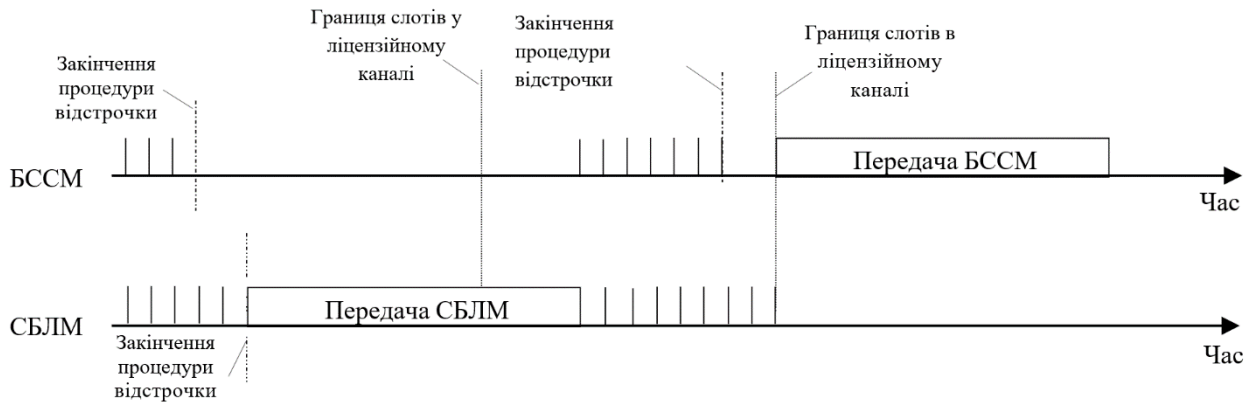


Рисунок 1.1 - Приклад роботи реалізації методу доступу LBT без сигналу

Одним з можливих рішень цієї проблеми, яке неявно мається на увазі 3GPP [40], часто використовується в літературі [23–25] та оціночних натурних експериментах [41], є відправка резервуючого сигналу (шуму) аж до найближчої границі слотів у ліцензованому каналі для того, щоб не допустити заняття каналу іншими пристроями, див. рис. 1.2.



Рисунок 1.2 - Приклад реалізації методу доступу LBT з резервуючим сигналом



Крім цього, у бездротових локальних та стільникових мережах істотно відрізняється механізм повідомлення про успішність спроби передачі даних. На відміну від бездротових локальних мереж, де кадр-підтвердження про прийом кадру даних надсилається в тому ж каналі через інтервал 5 мс.

На додаток до цього, у специфікаціях 3GPP відсутній будь-який аналог механізму RTS/CTS, а також суттєво відрізняється механізм визначення колізії, тобто події, при настанні якої необхідно подвоювати поточне значення  $W$  конкурентного вікна.

У бездротових локальних мережах СБЛМ вважає, що сталася колізія, якщо після передачі даних не прийшов кадр-підтвердження. У стільникових мережах підтвердження (позитивне чи негативне) приходять завжди, хай і з деякою затримкою, тому використання аналогічного підходу неможливе.

Розглянемо докладніше структуру передачі в неліцензованому каналі стільникових мереж. У стільникових мережах передача даних складається з послідовно йдучих підкадрів. Тривалість підкадра в мережах LTE-LAA становить 1 мс, в мережах NR-U вона може бути зменшена до 500 або 250 мкс [42]. Внаслідок цього на кожну передачу БССМ надходить безліч підтверджень. Зауважимо, що кадри даних, які опинилися в колізії, можуть мати різну довжину, а також те, що всі пристрої, що змагаються за канал, використовують метод доступу CSMA/CA. Через це механізм визначення колізій в стільникових мережах враховує тільки перший підкадр передачі і збільшує конкурентне вікно тільки якщо він пошкоджений.

Незважаючи на те, що кілька мереж LTE-U були запущені в ряді країн, технології, стандартизовані консорціумом 3GPP, — LTE-LAA, LTE-eLAA, LTE-feLAA, NR-U - набули значно більшого поширення [43]. У зв'язку з цим у даній магістерській дипломній роботі розглядатиметься лише взаємодія стільникових мереж, що використовують метод доступу LBT, з бездротовими локальними мережами.

#### 1.4 Про ефективність методів доступу до загального каналу

Однією з поставлених 3GPP цілей [44] при розробці методу доступу до неліцензованого каналу в стільникових мережах було забезпечення справедливого спільного існування з бездротовими локальними мережами.

Визначення того, який розподіл каналних ресурсів між пристроями різних технологій є справедливим, є складним завданням, яке має безліч рішень [44–46].

Зазвичай при оцінці справедливості розподілу каналних ресурсів між СБЛМ наступні сценарії. У першому з них - базовому -  $N$  СБЛМ працюють в одному неліцензованому каналі і знаходяться в області радіовидимості один одного, див. рис. 1.3. У другому сценарії, який називається сценарієм спільного існування, проводиться заміна СБЛМ на БССМ, див. рис. 1.4.

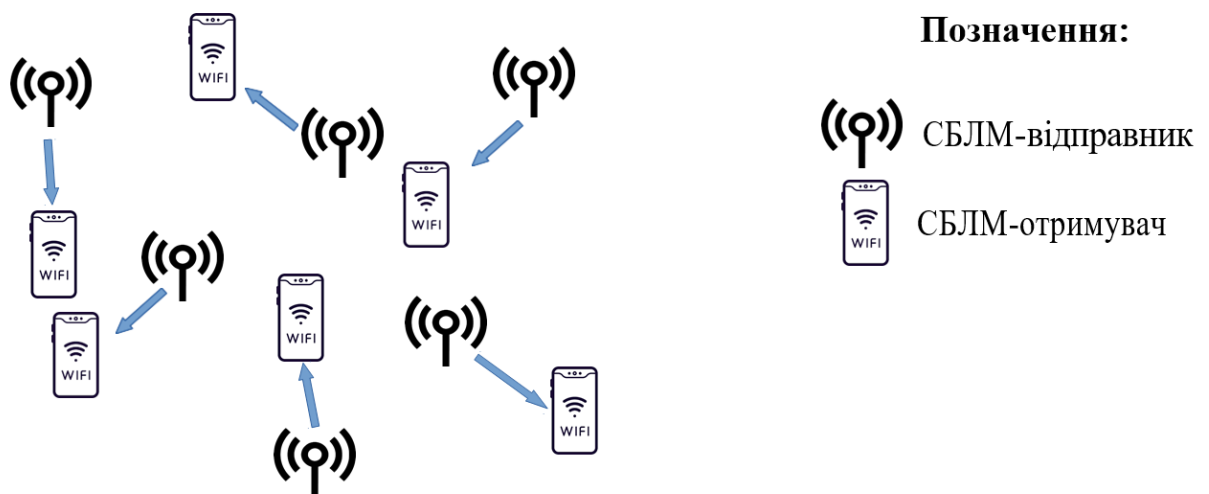


Рисунок 1.3 - Базовий сценарій

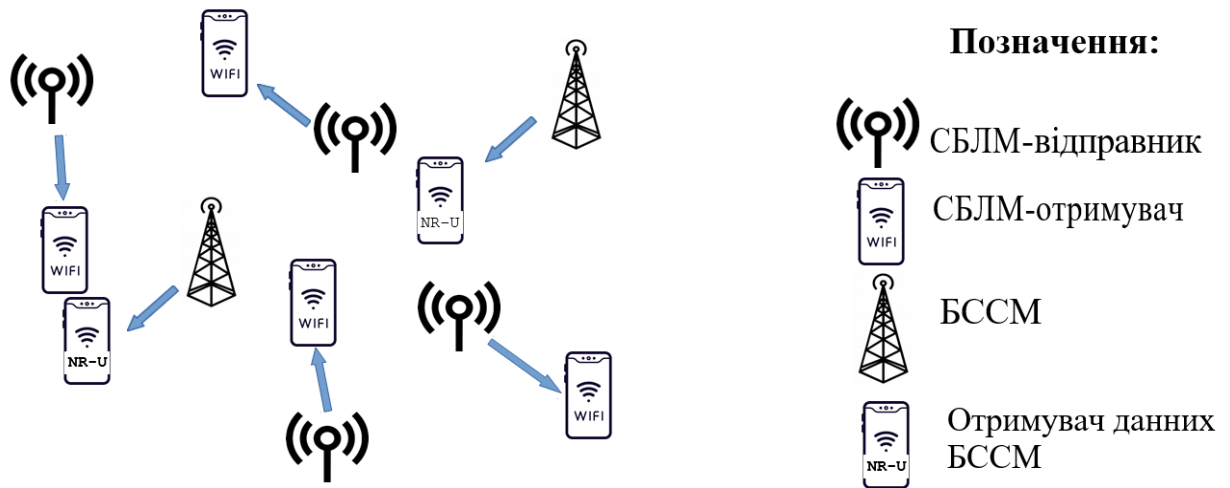


Рисунок 1.4 - Сценарій спільного існування

Введемо такі позначення:

- $S_{w,base}$  — це пропускна здатність бездротової локальної мережі в базовому сценарії;
- $S_{w,coex}$  — це пропускна здатність бездротової локальної мережі в сценарії сов місцевого існування;
- $S_{l,coex}$  — це пропускна здатність стільникової мережі в сценарії спільного існування;
- $\Theta_{w,coex}$  — це сумарний час, зайнятий передачами СБЛМ у сценарії спільного існування;
- $\Theta_{l,coex}$  - це сумарний час, зайнятий передачами БССМ у сценарії спільного існування.

Згідно з визначенням, що використовується в [26, 45], розподіл ресурсів є справедливим, якщо рівні пропускні можливості всіх СБЛМ/БССМ, тобто, коли виконана рівність:

$$\frac{S_{l,coex}}{x} = \frac{S_{w,coex}}{N-x}. \quad (1.1)$$

Крім того, [45] розглядалося ще одне визначення справедливості, згідно з яким розподіл каналних ресурсів у сценарії спільного існування справедливо, якщо пропускні здібності мереж обох технологій рівні незалежно від числа активних пристроїв, тобто коли виконано таку рівність:

$$S_{l,coex} = S_{w,coex}. \quad (1.2)$$

У [46] було введено визначення справедливості, що використовує не пропускну здатність мереж, а кількість спожитого пристроями каналного часу. Зокрема, розподіл каналних ресурсів вважається справедливим, якщо в середньому всі пристрої передавали протягом однакової кількості каналного часу:

$$\frac{\Theta_{l,coex}}{x} = \frac{\Theta_{w,coex}}{N-x}. \quad (1.3)$$

У цій магістерській дипломній роботі дотримуватимемося визначення, використовуваного консорціумом 3GPP [44]. Відповідно до нього метод доступу БССМ можна назвати справедливим, якщо при його використанні негативний вплив БССМ на продуктивність навколишніх СБЛМ не перевищує такий вплив ще однієї СБЛМ. Інакше кажучи, метод доступу БССМ до неліцензованого каналу є справедливим, якщо заміні СБЛМ на БССМ питома пропускна спроможність залишилися СБЛМ не зменшилася, тобто, виконано таку умову:

$$\frac{S_{w,coex}}{N-x} \geq \frac{S_{w,base}}{N}. \quad (1.4)$$

З іншого боку, метод доступу БССМ до неліцензованого каналу може бути ефективним, тобто, пропускна спроможність БССМ повинна бути вищою за пропускну спроможність СБЛМ, яку їй замінили, тобто, має бути виконано таку умову:

$$\frac{S_{l,coex}}{x} \geq \frac{S_{w,base}}{N} \quad (1.5)$$

Зауважимо, що якщо нерівність (1.5) не виконується, то проводити заміну СБЛМ на БССМ немає сенсу, оскільки у разі оператора зв'язку з погляду пропускної спроможності вигідніше використовувати технологію Wi-Fi.

Для того щоб оцінити ефективність і справедливість поділу каналних ресурсів, при проведенні чисельних експериментів оцінюватимемо приріст  $G_w$  ( $G_l$ ) пропускної спроможності бездротової локальної (стільникової) мережі в сценарії спільного існування по відношенню до базового сценарію таким чином:

$$G_w = \frac{\frac{S_{w,coex}}{N-x} - \frac{S_{w,base}}{N}}{\frac{S_{w,base}}{N}}. \quad (1.6)$$

$$G_l = \frac{\frac{S_{l,coex}}{x} - \frac{S_{w,base}}{N}}{\frac{S_{w,base}}{N}}, \quad (1.7)$$

Зауважимо, що згідно з введеними визначеннями (1.4) та (1.5), метод доступу до каналу БССМ є справедливим та ефективним, якщо обидва прирости (1.6) та (1.7) пропускної спроможності є позитивними.

### 1.5 Проблема асиметричних колізій

Розберемо одну з причин, через яку використання БССМ методу доступу до каналу з резервуючим сигналом може призводити до несправедливого розподілу каналних ресурсів з точки зору СБЛМ.

Розглянемо випадок, коли СБЛМ використовує механізм RTS/CTS. Нехай СБЛМ та БССМ одночасно закінчили процедуру відстрочення та розпочали передачу кадру RTS та резервуючого сигналу, відповідно. Якщо тривалість кадру RTS менша, ніж тривалість резервуючого сигналу, відбудеться «асиметрична» колізія, див. рис. 1.5. У цій ситуації СБЛМ не отримає у відповідь кадру CTS, задетектує колізію і подвоїть поточне значення свого конкурентного вікна. У той же час БССМ не задетектує колізію, оскільки дані, що передаються нею, не будуть пошкоджені, і встановити поточне значення конкурентного вікна рівним мінімальному значенню. Очевидно, що це призведе до більш високої ймовірності доступу БССМ до каналу, а отже, несправедливого поділу частотних ресурсів.

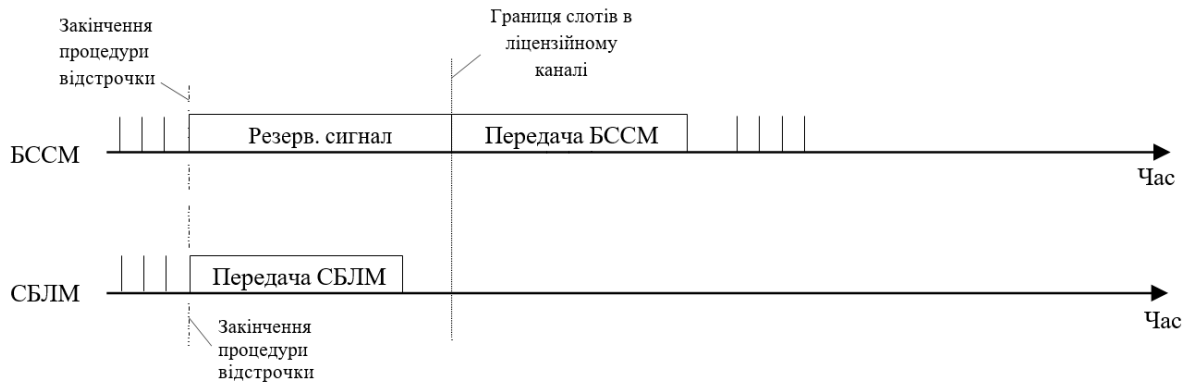


Рисунок 1.5 - Приклад асиметричної колізії при використанні реалізації методу LBT з резервуючим сигналом

Більш докладно вплив проблеми асиметричних колізій на пропускну спроможність бездротових локальних та стільникових мереж буде оцінено в розділі 2 даної магістерської дипломної роботи.

## 1.6 Огляд літератури та постановка завдань магістерської дипломної роботи

### 1.6.1 Дослідження методів доступу до неліцензованого каналу в стільникових мережах

У літературі аналізу взаємодії бездротових локальних і стільникових мереж присвячено безліч робіт.

У частині їх розглядається робота стільникових мереж, побудованих з урахуванням технології LTE-U і використовують метод доступу до каналу CSAT [47–52].

У роботах [47, 48] авторами було показано, що якщо БССМ використовують тривалості ON- та OFF-періодів, визначені в специфікації LTE-U, пропускну спроможність працюючих поруч СБЛМ значно знижується. [49] було запропоновано спосіб оптимізації параметрів методу CSAT на основі теорії випадкових блукань. [50–53] показано, як можна оптимізувати

тривалість ON- і OFF-періодів за допомогою різних методик машинного навчання.

Метод доступу до неліцензованого каналу для стільникових мереж, аналогічний CSAT, був запропонований в роботах [54, 55]. Зокрема, в [54, 55] передбачається, що БССМ може почати передачу через інтервал  $SIF S = 16$  мкс після закінчення передачі СБЛМ, тобто, БССМ отримує доступ до каналу без конкуренції із СБЛМ. За допомогою аналітичного моделювання автори показали, як такий підхід може бути використаний для збільшення продуктивності стільникових мереж. На жаль, аналітична модель була побудована для випадку однієї БССМ і неясно, чи буде запропонований підхід ефективний у разі більшої кількості БССМ.

У ряді інших робіт аналізується ефективність взаємодії бездротових локальних мереж та стільникових мереж, що використовують метод доступу до середовища LBT, а також пропонуються його різні модифікації. Слід зазначити, що у всіх згаданих роботах, крім [56], розглядається лише реалізація методу доступу LBT з резервуючим сигналом.

У [25] автори за допомогою імітаційного моделювання порівняли справедливість та ефективність розподілу каналних ресурсів при використанні в стільникових мережах методів доступу CSAT та LBT. Згідно з отриманими результатами, якщо тривалість передачі БССМ досить велика (50 мс), домогтися справедливого та ефективного спільного існування можна як при використанні методу доступу CSAT, так і при використанні методу доступу LBT. Якщо ж використовувати більш коротку тривалість передачі БССМ (10 мс), метод доступу LBT показує справедливіший розподіл ресурсів порівняно з CSAT.

У [57] автори порівняли пропускну спроможність реалізації методу доступу LBT з резервуючим сигналом з реалізацією, що не має обмеження на моменти початку передачі даних в неліцензованому каналі тобто, коли БССМ може розпочати передачу у довільний час. За допомогою імітаційного моделювання було показано, що використання реалізації LBT без обмежень на

моменти початку передачі дозволяє отримати на 40% більшу пропускну здатність.

У [58] була розроблена аналітична модель, що дозволяє оцінити пропускну здатність стільникової мережі у сценарії без СБЛМ. Модель була розроблена для випадку, коли всі БССМ використовують реалізацію методу доступу LBT з сигналом, що резервує, і враховує існування накладних витрат, викликаних необхідністю передачі резервуючого сигналу. Істотним недоліком даної роботи є те, що автори не розглядають взаємний вплив БССМ та СБЛМ.

Аналітична модель, що дозволяє оцінити пропускну спроможність бездротової локальної та стільникових мереж, що працюють у режимі насичення, у сценарії спільного існування була представлена в [59]. Зокрема, автори розглядають реалізацію методу доступу LBT з резервуючим сигналом і конкурентним вікном фіксованого розміру. Розроблена модель дозволила знайти оптимальне значення конкурентного на БССМ з допомогою повного перебору. На жаль, автори не враховують накладні витрати, викликані використанням резервуючого сигналу, а також інші реалізації методу доступу LBT, зокрема, з двійковим експоненціальним конкурентним вікном (яке використовується у специфікації 3GPP) або реалізацію без резервуючого сигналу.

У [60] автори розглянули два варіанти процедури відстрочення методу доступу LBT (з постійним і двійковим експоненційним конкурентним вікном) і розробили аналітичну модель на основі ланцюгів Маркова для оцінки пропускну спроможності бездротових локальних і стільникових мереж, що працюють в одному неліцензованому каналі. Відповідно до отриманих результатів, при використанні значень параметрів методів доступу, заданих за замовчанням у відповідних стандарти/специфікації, пропускну здатність СБЛМ помітно знижується, особливо коли БССМ використовує фіксоване значення конкурентного вікна.

В [61] автори розробили модуль LTE-LAA для середовища імітаційного моделювання ns-3 і проаналізували ефективність методу доступу LBT у



сценарії спільного існування з бездротовими локальними мережами в ненасиченому випадку. Було показано, що БССМ, що використовує метод доступу LBT з резервуючим сигналом, досягає більшої пропускної спроможності в порівнянні з СБЛМ, але це відбувається за рахунок помітного зменшення пропускної спроможності бездротової локальної мережі.

У [62] було проведено дослідження взаємодії бездротових локальних та стільникових мереж за допомогою імітаційного моделювання в середовищі ns-3. Автори показали, що справедливість розподілу каналних ресурсів може істотно залежати не тільки від значень параметрів методів доступу, що використовуються, але і від взаємного розташування БССМ і СБЛМ.

В [63] автори порівняли ефективність методів доступу до середовища CSAT і LBT в ненасиченому сценарії за допомогою середовища імітаційного моделювання ns-3. Було показано, що продуктивність стільникової мережі залежить не тільки від методу доступу, що використовується, але і від інших параметрів, наприклад, використовуваного протоколу транспортного рівня (TCP або UDP), використовуваного СБЛМ алгоритму вибору сигнально-кової конструкції, та інших параметрів.

Спільне існування бездротових локальних і стільникових мереж у ненасиченому сценарії розглядалося в [56]. За допомогою імітаційного моделювання автори порівняли різні підходи для досягнення справедливого взаємного існування розглянутих мереж. Зокрема, вони розглянули різні межі визначення зайнятості каналу, різні тривалості передачі БССМ, реалізації LBT з використанням та без використання резервуючого сигналу. Згідно з отриманими результатами, найбільш перспективним рішенням є обмеження тривалості сигналу, що резервує, за часом трьома OFDM-символами, тобто, приблизно 215 мкс.

В [64] був запропонований спосіб зменшення накладних витрат, пов'язаних з відпракою резервуючого сигналу, при використанні методу доступу LBT. Автори пропонують БССМ на початку слота в ліцензованому

каналі призупиняти відлік процедури відстрочення і відновлювати його, коли до наступної границі слотів залишиться трохи часу.

У [65] автори запропонували наполегливу модифікацію методу доступу LBT. При використанні цієї модифікації після закінчення процедури відстрочення БССМ з ймовірністю  $p$  починає передачу даних, а з ймовірністю  $1 - p$  повторює процедуру відстрочення, використовуючи поточне значення конкурентного вікна. Для оцінки ефективності запропонованого методу [65] була розроблена аналітична модель.

У роботі [66] було запропоновано одночасно змінювати тривалість передачі та розмір конкурентного вікна БССМ для оптимізації її пропускної спроможності. Крім того, для того, щоб зарезервувати канал, автори пропонують посилати не резервуючий сигнал, а кадр CTS-to-self, описаний у стандарті Wi-Fi [14].

У [67] автори розробили алгоритм адаптивного вибору поточного значення  $W$  конкурентного вікна, яке використовує емпіричну оцінку ймовірності колізії. Ця оцінка враховує як статистику неуспішних передач БССМ, так і статистику порожніх/зайнятих слотів відстрочення БССМ.

Крім того, у ряді робіт розглядалися інші способи збільшення ефективності стільникових мереж у неліцензованому спектрі. Наприклад, у [68–70] досліджувалося спільне існування бездротових локальних та стільникових мереж при використанні різних значень параметрів механізмів визначення зайнятості каналу.

#### 1.6.2 Методи виявлення та дозволу колізій у бездротових мережах з методом доступу до каналу CSMA

Як буде показано в розділах 2 і 3, обидві розглянуті реалізації методу доступу до каналу в мережах мають свої недоліки. Так, наприклад, використання методу доступу LBT без резервуючого сигналу, розглянутого в розділі 3, зі значеннями параметрів, заданими за замовчуванням у специфікації

3GPP, призводить до неефективної роботи БССМ. Налаштування значень параметрів методу доступу БССМ без резервуючого сигналу за допомогою аналітичної моделі, описаної в розділі 3, дозволяє досягти ефективного і справедливого спільного існування бездротових локальних і сотових мереж, але через обмеження методу доступу LBT це можливо не у всіх випадках. Використання методу доступу з резервуючим сигналом при значеннях параметрів, заданих за замовчуванням у специфікації 3GPP, навпаки, призводить до несправедливого поділу каналних ресурсів з точки зору СБЛМ. Це відбувається через те, що, по-перше, при використанні резервуючого сигналу з'являються накладні витрати, по-друге, можуть виникати асиметричні колізії передач СБЛМ та БССМ (див. розділ 1.5). Крім того, оскільки в стільникових мережах відсутній будь-який аналог механізму RTS/CTS, колізія передач двох БССМ займає досить тривалий проміжок часу, що також негативно позначається на пропускній здатності і бездротових локальних, і стільникових мереж. У цій магістерській дипломній роботі пропонується вдосконалити метод доступу LBT з резервуючим сигналом, по можливості позбавивши його вищезгаданих недоліків і підвищивши таким чином його ефективність. Зокрема, автором дипломної роботи був розроблений метод виявлення та дозволу колізій для БССМ, заснований на передачі резервуючого сигналу, що дозволяє знизити вплив колізій на ефективність стільникових мереж, уникнути асиметричних колізій і таким чином покращити справедливість та ефективність спільного існування бездротових локальних та стільникових мереж.

Розглянемо, які існують механізми для мереж з методом доступу, заснованим на CSMA, що дозволяють знизити вплив колізій на пропускну здатність, крім розглянутого механізму RTS/CTS у бездротових локальних мережах Wi-Fi.

У провідних мережах, побудованих за технологією Ethernet [72, 73], використовується метод доступу CSMA з детектування колізій (CSMA/CD). При використанні CSMA/CD одночасно з передачею даних пристрій Ethernet

прослуховує канал і припиняє поточну передачу, якщо на тлі свого сигналу виявляє передачу стороннього сигналу, мінімізуючи цим тривалість колізії. У бездротових мережах такий підхід виявляється незастосовним, оскільки зазвичай потужність сигналу, що посиляється, значно перевищує потужність сигналу, що приймається, а, отже, задетектувати чужий сигнал на тлі передачі свого сигналу дуже складно.

Тим не менш, у літературі є ряд робіт, присвячених розробці методів доступу до каналу для бездротових мереж, що забезпечують можливість детектувати та дозволяти колізії [74–79].

У [74] було запропоновано один із перших механізмів, з допомогою якого можна детектувати колізію в бездротових мережах з методом доступу CSMA. Зокрема, автори запропонували механізм під назвою CSMA/TCD (CSMA with Timesplit Collision Detection). При використанні CSMA/TCD станція передає преамбулу кадру, слухає канал і, якщо канал виявляється не зайнятий, посилає кадр даних. В іншому випадку, якщо станція виявляє під час прослуховування, що канал зайнятий, вона перериває поточну спробу передачі. Основним недоліком CSMA/TCD є те, що він призначений для бездротових мереж з великою затримкою розповсюдження сигналу, яка повинна перевищувати час, необхідний станції для перемикавання з передаючого в режим приймання і визначення зайнятості каналу. На жаль, через те, що і бездротові локальні мережі Wi-Fi, і стільникові мережі LTE-LAA (NR-U) використовуються в сценаріях із затримками поширення сигналу менше 1 мкс, CSMA/TCD не може бути в них застосований. Це пов'язано з тим, що типовий час, необхідний для перемикавання з передавального приймаючого режиму становить близько 2 мкс [75], а приймачеві Wi-Fi згідно стандарту необхідно близько 4 мкс для визначення зайнятості каналу. Крім CSMA/TCD, подібний підхід був запропонований у роботі [75], в якій автори описали протокол CSMA/TA (англ. CSMA with Transmission Acquisition).

Ідея CSMA/TCD була пізніше розширена у механізмі WCSMA/CD (англ. Wireless CSMA with Collision Detection) [76, 77]. При використанні

WCSMA/CD кожна передача починається з дозволу колізії. Протягом цього періоду станція випадково вибирає невеликий інтервал часу, протягом якого вона зупиняє передачу даних і прослуховує канал. Якщо станція виявляє, що канал зайнятий, вона припиняє поточну спробу передачі, що дозволяє зменшити тривалість колізії.

У [78] автори запропонували механізм CSMA/CR (англ. CSMA with Collision Resolution), що дозволяє вирішувати колізії. В цілому, він схожий з механізмом WCSMA/CD, за винятком того, що станція, яка першою виявила під час прослуховування зайнятість каналу, починає передавати спеціальний сигнал, званий jamming-сигналом. Передбачається, що станція під час прослуховування завжди може визначити наявність сигналу jamming на тлі інших сигналів. Якщо станція під час прослуховування виявляє передачу jamming-сигналу, то вона відкладає свою спробу передачі. Наприкінці періоду дозволу колізії починає передачу станція, що посиляє jamming сигнал, і таким чином колізія дозволяється. Ефективність CSMA/CR була пізніше поліпшена [79], де автори розбили період дозволу колізії на кілька частин, що дозволило підвищити ймовірність дозволу колізії.

На жаль, механізми, запропоновані в [77–79], мають один істотний недолік, що не дозволяє їх застосувати в бездротових локальних мережах Wi-Fi та стільникових мережах LTE-LAA/NR-U. Для їх реалізації потрібні значні зміни у відповідному стандарті/специфікації, оскільки структура кадрів даних повинна бути змінена таким чином, щоб одержувач міг декодувати кадр, у якому присутні паузи, становище яких одержувачу заздалегідь невідомо. Крім того, подібні зміни викликають проблеми зі зворотною сумісністю вже існуючих пристроїв, які не зможуть декодувати передачі нового типу.

Інший підхід, що розглядається в деяких роботах для вирішення колізій, наприклад, [80–83], полягає в тому, щоб використовувати окремий канал для повідомлення про колізію, що відбулася. Хоча протоколи такого типу можуть показувати хороші результати з точки зору пропускної спроможності, вони не

мають зворотної сумісності з існуючими пристроями і тому не можуть бути використані в сучасних бездротових локальних мережах Wi-Fi.

### 1.7 Висновки до розділу 1

Підведемо підсумок. Незважаючи на те, що спільному існуванню бездротових локальних та стільникових мереж у літературі присвячено безліч робіт, дослідженню реалізації методу доступу LBT без використання резервуючого сигналу не було приділено достатньої уваги. Крім того, практично в жодній роботі не враховується вплив асиметричних колізій на пропускну здатність бездротових локальних та стільникових мереж.

Першим завданням магістерської дипломної роботи є порівняльний аналіз ефективності різних реалізацій методу випадкового доступу LBT до загального каналу в стільникових мережах при спільному існуванні з бездротовими локальними мережами.

Для цього було поставлено дві підзадачі. Першим підзавданням є розробка аналітичної моделі, що дозволяє оцінити пропускі здібності безпроводової локальної та стільникової мереж при спільному існуванні в одному неліцензованому каналі за умови, що базова станція стільникової мережі використовує реалізацію методу доступу до каналу LBT з резервуючим сигналом. Крім того, розроблена модель повинна дозволяти оцінити справедливість розподілу ресурсів між пристроями різних технологій (див. розділ 1.4) та враховувати вплив асиметричних колізій (див. розділ 1.5).

Другим підзавданням є розробка аналітичної моделі, що дозволяє оцінити справедливість розподілу каналних ресурсів, а також пропускі здібності бездротової локальної та стільникової мереж при спільному існуванні в одному неліцензованому каналі за умови, що базова станція стільникової мережі використовує реалізацію методу доступу LBT без резерву.

Можна також зробити висновок, що у літературі не було виявлено методів зниження впливу колізій для БССМ, враховуючих особливості використовуваного в стільникових мережах методу доступу LBT.

У зв'язку з цим, другим завданням магістерської дипломної роботи є збільшення ефективності методу доступу до середовища LBT для базових станцій мережі за рахунок додавання можливості виявлення та дозволу колізій.

Для цього було поставлено дві підзадачі. Першим підзавданням є розробка методу дозволу колізій для базових станцій стільникових мереж, що дозволяє виявляти та дозволяти колізії передач станцій бездротової локальної мережі та базових станцій стільникової мережі, а також покращити справедливість поділу каналних ресурсів між пристроями бездротової локальної та стільникової мереж.

Другим підзавданням є побудова аналітичної моделі роботи системи з СБЛМ і БССМ, що використовують запропонований метод виявлення і розширення колізій, що дозволяє оцінити ймовірність дозволу колізії, знайти оптимальні значення параметрів запропонованого методу в залежності від різних умов, а також знайти пропускні здатності бездротової локальної та стільникової мереж.

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ДОСТУПУ ДО ЗАГАЛЬНОГО КАНАЛУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РЕЗЕРВУЮЧОГО СИГНАЛУ

У цьому розділі представлена розроблена аналітична модель роботи системи, що складається з  $N_1$  БССМ і  $N_w$  СБЛМ, що знаходяться в зоні радіовидимості один одного. Передбачається, що це БССМ і СБЛМ перебувають у насиченні, тобто вони завжди мають пакети передачі. З іншого боку, вважатимемо умови у каналі ідеальними, тобто, втрата пакетів відбувається лише через колізію.

Описана в цьому розділі модель побудована для випадку, в якому після закінчення процедури відстрочення БССМ посилає резервуючий сигнал аж до найближчої межі слотів в ліцензованому каналі, як і в більшості робіт, знайдених у літературі. На відміну від інших робіт, розроблена модель дозволяє врахувати вплив асиметричних колізій на пропускну здатність обох мереж.

Подальший виклад у цьому розділі побудовано так. У розділі 2.1 докладно описані припущення, в яких було проведено моделювання системи, що розглядається, а також представлена розроблена аналітична модель. Після цього, в розділі 2.2 проведено оцінку точності розробленої аналітичної моделі за допомогою імітаційного моделювання, а також подано результати чисельного моделювання.

Для зручності прочитання всі основні позначення, що використовуються у цьому розділі, показано у таблиці 2.1.



Таблиця 2.1 - Список основних позначень, що використовуються у розділі 2

Позначення	Опис
$\theta$	тривалість слоту в ліцензованому каналі
$\tau_w (\tau_l)$	ймовірність того, що обрана СБЛМ (БССМ) вибере поточний віртуальний слот для передачі
$W_{min} (W_{max})$	мінімальне (максимальне) значення конкурентного вікна
$\rho_w (\rho_l)$	ймовірність неуспішної спроби передачі СБЛМ (БССМ) при умові, що вона вибрала поточний слот для передачі
$N_w (N_l)$	число СБЛМ (БССМ) в системі, що розглядається
$\sigma$	тривалість порожнього слоту
$T_{slot}$	середня тривалість віртуального слоту
$S_w (S_l)$	пропускна спроможність бездротової локальної (стільникової) мережі
$T_l$	тривалість передачі БССМ
$T_{w,s}$	тривалість успішної передачі СБЛМ
$T_{w,c}$	тривалість неуспішної передачі СБЛМ
$d_w$	обсяг даних, що передаються СБЛМ за $T$ , у разі успішної передачі
$d_l$	обсяг даних, що передаються БССМ за $T$ у разі успішної передачі

## 2.1 Аналітична модель

### 2.1.1 Припущення, що використовуються

Як і в [84], будемо припускати, що кількість спроб передачі одного пакета не обмежується.

Вважатимемо, що передача БССМ з урахуванням тривалості резервуючого сигналу складає сумарно  $T_l$  секунд і відповідає значенню  $TXOP_{limit}$  (оскільки пристрої працюють в режимі насичення), визначеному в

специфікації. Протягом успішної (безколізійної) передачі БССМ доставляє  $d(1 - t/T_l)$  байт даних. Зазначимо, що оскільки кожен підкадр даних передачі БССМ декодується незалежно, вважатиметься, що не порушена колізією частина передачі БССМ успішно приймається.

Тривалість успішної передачі СБЛМ дорівнює  $T_{w,s} < T_l$ , тому що в стандарті безпроводних локальних мереж Wi-Fi значення  $TXOP_{limit}$  за замовчуванням менше аналогічних значень у специфікаціях стільникових мереж LTE-LAA/NR-U. Крім того, будемо припускати, що неуспішна спроба передачі СБЛМ триває  $T_{w,c} \ll T_{w,s}$ , у разі використання механізму RTS/CTS і  $T_{w,c} \approx T_{w,s}$ , в іншому випадку. У разі успішної передачі СБЛМ доставляє  $d_w$  байт даних.

Будемо вважати, що тривалість  $t$  інтервалу між кінцем процедури відстрочення БССМ і наступною межею слотів у неліцензованому каналі розподілена рівномірно на інтервалі  $[0, \theta)$ , де  $\theta$  — це тривалість слотів в ліцензованому каналі. Зазначимо, що в стільникових мережах LTE-LAA четвертого покоління значення  $\theta$  дорівнює 500 мкс, в той час як у стільникових мережах NR-U п'ятого покоління БССМ, що розробляються зараз, зможе використовувати менші значення  $\theta$ , наприклад, 250 або 125 мкс, завдяки гнучкій нумерології.

### 2.1.2 Опис моделі

Оскільки лічильники відстрочки всіх СБЛМ і БССМ працюють синхронно, будемо використовувати добре відомий підхід, заснований на понятті віртуального слоту, запропонований вперше Дж. Б'янкі [84]. Відповідно до цього підходу, віртуальним слотом є інтервал часу між двома послідовними відліками процедури відстрочки.

Введемо ймовірність  $\tau_l$  ( $\tau_w$ ) того, що БССМ (СБЛМ) вибере поточний слот для передачі. Щоб знайти  $\tau$ , скористаємося підходом, описаним в [84],

тобто, підрахуємо, скільки в середньому віртуальних слотів відрахує станція для того, щоб зробити одну спробу передачі:

$$\tau = \frac{1}{1 + \frac{W_{min}-1}{2} + \rho \cdot \frac{W_{min}}{2} \sum_{i=0}^{m-1} (2\rho)^i} = \frac{2}{1 + W_{min} + \rho W_{min} \frac{1-(2\rho)^m}{1-2\rho}}, \quad (2.1)$$

де  $\rho$  – це ймовірність неуспішної спроби передачі БССМ (СБЛМ) за умови, що вона вибрала поточний слот для передачі, а  $m = \log_2(\lceil W_{max}/W_{min} \rceil)$  – це число різних значень поточного конкурентного вікна БССМ (СБЛМ)

Вибрана СБЛМ успішно передає дані у віртуальному слоті, якщо жодна з інших СБЛМ і жодна з БССМ не вибрали цей слот передачі. В результаті ймовірність  $\rho_w$  можна знайти таким чином:

$$\rho_w = 1 - (1 - \tau_w)^{N_w-1} (1 - \tau_l)^{N_l}. \quad (2.2)$$

Передача даних обраної БССМ не пошкоджена, якщо жодна з інших БССМ не вибрала даний слот для передачі (це відбувається з ймовірністю  $(1 - \tau_l)^{N_l-1}$ ), тоді як жодна з СБЛМ не вибрала даний слот для передачі (це відбувається з ймовірністю  $(1 - \tau_w)^{N_w}$ ), або хоча б одна із СБЛМ вибрала даний слот для передачі (це відбувається з ймовірністю  $1 - (1 - \tau_w)^{N_w}$ ), але тривалість її передачі виявилася меншою, ніж тривалість резервуючого сигналу, переданого БССМ (це відбувається з ймовірністю  $1 - \min(T_{w,c}, \theta)/\theta$ ).

У результаті ймовірність  $\rho_l$  можна знайти таким чином:

$$\rho_l = 1 - (1 - \tau_l)^{N_l-1} \left[ (1 - \tau_w)^{N_w} + (1 - (1 - \tau_w)^{N_w}) \left( 1 - \frac{\min(T_{w,c}, \theta)}{\theta} \right) \right]. \quad (2.3)$$

Вирішивши систему рівнянь (2.1) – (2.3), обчислюємо шукані ймовірності  $\tau$  і  $\rho$ . Використовуючи знайдені значення, пропускну здатність  $S_w$  бездротової локальної мережі знаходиться за такою формулою:

$$S_w = \frac{\pi_{w,s} d_w}{T_{slot}}, \quad (2.4)$$

де  $T_{slot}$  – це середня тривалість віртуального слоту,  $\pi_{w,s}$  – це ймовірність того, що в обраному віртуальному слоті якась СБЛМ успішно передасть свої дані, яка визначається наступним чином:

$$\pi_{w,s} = N_w \tau_w (1 - \tau_w)^{N_w - 1} (1 - \tau_l)^{N_l}. \quad (2.5)$$

Знайдемо пропускну здатність стільникової мережі  $S_l$ . Для цього підрахуємо середню кількість даних, що передаються всіма БССМ у різних типах віртуальних слотів, а також знайдемо ймовірність слотів кожного типу.

Якщо одна БССМ вибрала і жодна з СБЛМ не вибрала даний слот для передачі (це відбувається з ймовірністю  $p_{l,1}$ ), в середньому БССМ передасть  $d_l(1 - \theta/(2T_l))$  байт, так як вона в середньому  $\theta/2$  секунд передає резервуючий сигнал, що не несе в собі ці або контрольні дані.

Крім цього, БССМ може успішно доставити всі або частину даних у разі коли відбулася колізія за участю передачі однієї БССМ і хоча б однієї СБЛМ (це відбувається з ймовірністю  $p_{l,2}$ ). Якщо тривалість передачі СБЛМ виявляється більшою, ніж тривалість резервуючого сигналу (це відбувається з ймовірністю  $\min(T_{w,c}, \theta)/\theta$ ), БССМ успішно доставить  $(1 - T_{w,c}/T_l)d_l$  байт даних, тому що залишилася частка передачі  $(T_{w,c}/T_l)$  виявляється пошкоджена передачею СБЛМ. В іншому випадку, якщо передача даних БССМ виявляється не пошкоджена колізією з передачею СБЛМ (це відбувається з ймовірністю  $1 - \min(T_{w,c}, \theta)/\theta$ ), БССМ успішно доставить  $(1 - (\theta + T_{w,c})/(2T_l))d_l$  байт даних, так як БССМ передаватиме резервуючий сигнал в середньому  $(\theta + T_{w,c})/2$  секунд.

Таким чином, пропускну здатність  $S_l$  стільникової мережі у випадку, коли в бездротовій локальній мережі не використовується механізм RTS/CTS, тобто,  $T_{w,s} \approx T_{w,c} > \theta$ , дорівнює:

$$S_l = \left[ p_{l,1} \left(1 - \frac{\theta}{2T_l}\right) + p_{l,2} \left(1 - \frac{T_{w,c}}{T_l}\right) \right] \frac{d_l}{T_{slot}}. \quad (2.6)$$

Інакше, якщо СБЛМ використовують механізм RTS/CTS, тобто  $T_{w,c} < \theta$ , пропускну здатність  $S_l$  стільникової мережі можна знайти таким чином:

$$S_l = \left[ p_{l,1} \left(1 - \frac{\theta}{2T_l}\right) + p_{l,2} \left( \frac{T_{w,c}}{\theta} \left(1 - \frac{T_{w,c}}{T_l}\right) + \left(1 - \frac{T_{w,c}}{\theta}\right) \left(1 - \frac{\theta + T_{w,c}}{2T_l}\right) \right) \right] \frac{d_l}{T_{slot}}. \quad (2.7)$$

Ймовірність  $p_{l,1}$  того, що даний віртуальний слот вибере для передачі будь-яку БССМ, а БССМ/СБЛМ, що залишилися, його не виберуть, визначається наступним чином:

$$p_{l,1} = N_l \tau_l (1 - \tau_l)^{N_l - 1} (1 - \tau_w)^{N_w}. \quad (2.8)$$

Ймовірність  $p_{l,2}$  того, що рівно одна БССМ і хоча б одна СБЛМ виберуть даний слот для передачі, можна знайти таким чином:

$$p_{l,2} = N_l \tau_l (1 - \tau_l)^{N_l - 1} (1 - (1 - \tau_w)^{N_w}). \quad (2.9)$$

Знайдемо середню тривалість  $T_{slot}$  віртуального слоту.

Віртуальний слот є порожнім і має тривалість  $\sigma$  з ймовірністю  $\pi_e$ , якщо жодна СБЛМ та жодна БССМ не вибрали його для передачі:

$$\pi_e = (1 - \tau_l)^{N_l} (1 - \tau_w)^{N_w}, \quad (2.10)$$

Знайдемо ймовірність  $\pi_{w,c}$  колізії у віртуальному слоті за участю передач тільки СБЛМ. Легко показати, що

$$\pi_{w,c} = (1 - (1 - \tau_w)^{N_w} - N_w \tau_w (1 - \tau_w)^{N_w - 1}) (1 - \tau_l)^{N_l}. \quad (2.11)$$

Використовуючи введені вірогідності віртуальних слотів (2.5), (2.10) і (2.11), середню тривалість віртуального слоту можна знайти наступним чином:

$$T_{slot} = \pi_{w,s} T_{w,s} + \pi_e \sigma + \pi_{w,c} T_{w,c} + (1 - \pi_e - \pi_{w,c} - \pi_{w,s}) T_l. \quad (2.12)$$

Таблиця 2.2 - Значення параметрів, які використовуються у розділі 2

Параметр	Значення
$W_{min}$	16
$W_{max}$	1024
$T_l$	8 мс
$T_{w,s}$	2,5 мс
$T_{w,c}$	44 мкс при використанні RTS/CTS; 2,5 мс в іншому випадку
$\sigma$	9 мкс
$\theta$	500 мкс
$dw$	187,5 Кбіт
$dl$	600 Кбіт

У результаті знайдено всі допоміжні величини, необхідні для обчислення пропускних здібностей бездротової локальної та стільникових мереж за формулами (2.4), (2.6) та (2.7), відповідно.

## 2.2 Чисельні результати

Якщо не зазначено інше, при чисельних експериментах з розробленою аналітичною моделлю були використані значення параметрів системи, зазначені в таблиці 2.2. Точність розробленої аналітичної моделі була оцінена за допомогою імітаційного моделювання. В імітаційній моделі не використовувався ряд припущень, які були використані при побудові аналітичної моделі, наприклад, припущення про рівномірну розподіленість тривалості інтервалу між закінченням процедури відстрочення БССМ і найближчою границею слотів у ліцензованому каналі. Згідно з отриманими

результатами, різниця між результатами роботи аналітичної та імітаційної моделей не перевищує 5-7% у всіх розглянутих сценаріях.

Розглянемо сценарій, у якому число СБЛМ дорівнює числу БССМ, і проварюємо загальну кількість станцій. Отримані за допомогою аналітичної та імітаційної моделі пропускні здатності бездротової локальної та стільникової мереж у такому сценарії показані на рис. 2.1.

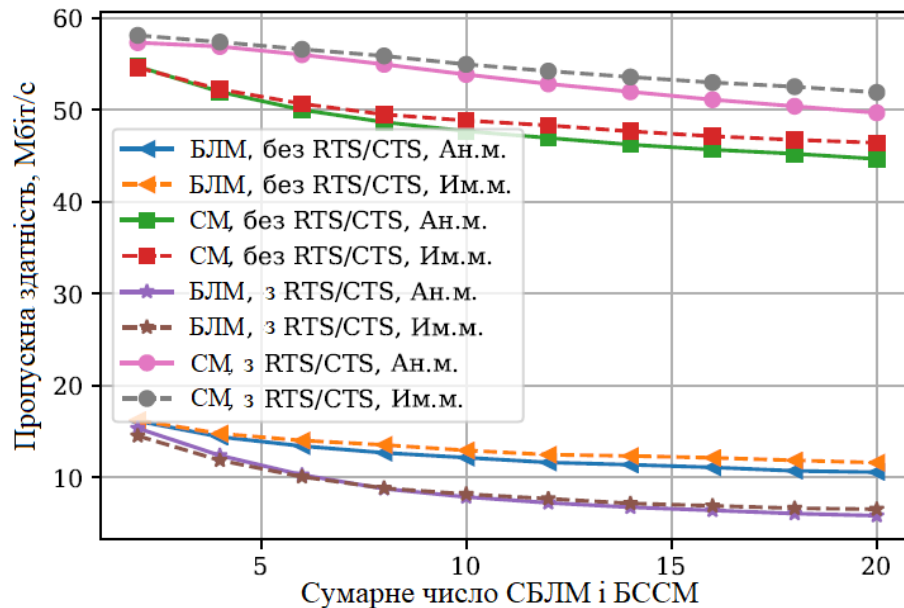


Рисунок 2.1 - Пропускна здатність бездротової локальної (БЛМ) та стільникової (СМ) мереж при рівній кількості СБЛМ та БССМ, отримана за допомогою аналітичної (Ан.м.) та імітаційної (Им.м.) моделей

Як можна помітити, пропускна здатність бездротової локальної мережі помітно нижче пропускної здатності мережі. Це може бути пояснено тим, що в даному експерименті і БССМ, і СБЛМ використовують значення параметрів доступу до загального каналу, задані за замовчуванням у відповідній специфікації/стандарті, а, отже, величина  $TXOP_{limit}$  у БССМ помітно більше, ніж у СБЛМ.

Крім того, слід зазначити, що використання механізму RTS/CTS у бездротовій локальній мережі призводить не до збільшення, а до зменшення її пропускної здатності. Це через те, що з колізії однієї передачі однієї БССМ і хоча б однієї СБЛМ у часто відбувається асиметрична колізія, тобто, у СБЛМ

спроби передачі виявляються неуспішними, і вони підвищують поточне значення конкурентного вікна, а спроба передачі БССМ є успішною, і вона встановлює конкурентне вікно рівним мінімального значення.

Приріст пропускної спроможності бездротової локальної та стільникової мереж в сценарії, що розглядається, показаний на рис. 2.2. Як можна помітити, розподіл каналних ресурсів є несправедливим з точки зору бездротової локальної мережі, в якій пропускна здатність знижується більш ніж удвічі без використання механізму RTS/CTS, а при його використанні більш ніж у п'ять разів. При цьому приріст пропускної спроможності стільникової мережі завжди позитивний через значну перевагу, що виникає при використанні більшого значення  $TXOP_{limit}$  та ігноруванні асиметричних колізій з передачами бездротової локальної мережі.

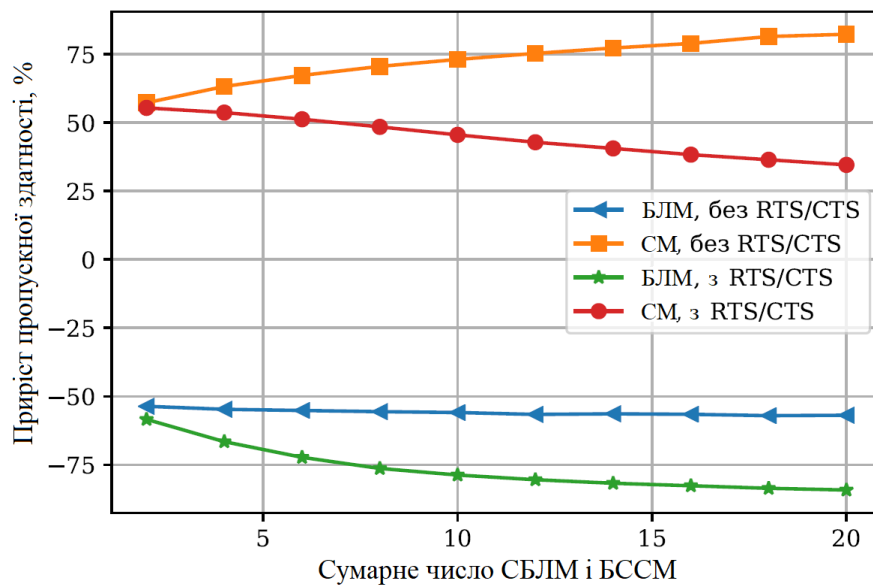


Рисунок 2.2 - Приріст пропускної спроможності бездротової локальної (БЛМ) та стільникової (СМ) мереж при рівній кількості СБЛМ та БССМ

Крім того, слід зазначити, що при використанні СБЛМ механізму RTS/CTS, приріст пропускної спроможності стільникової мережі знижується зі зростанням сумарного числа станцій. Це пояснюється тим, що в стільникових мережах відсутні механізми зниження негативного впливу колізій на пропускну здатність мережі. Більше того, сумарна пропускна



здатність обох мереж значно знижується (до 25%) у цьому випадку через неефективність методу доступу LBT з резервуючим сигналом, див. рис. 2.3.

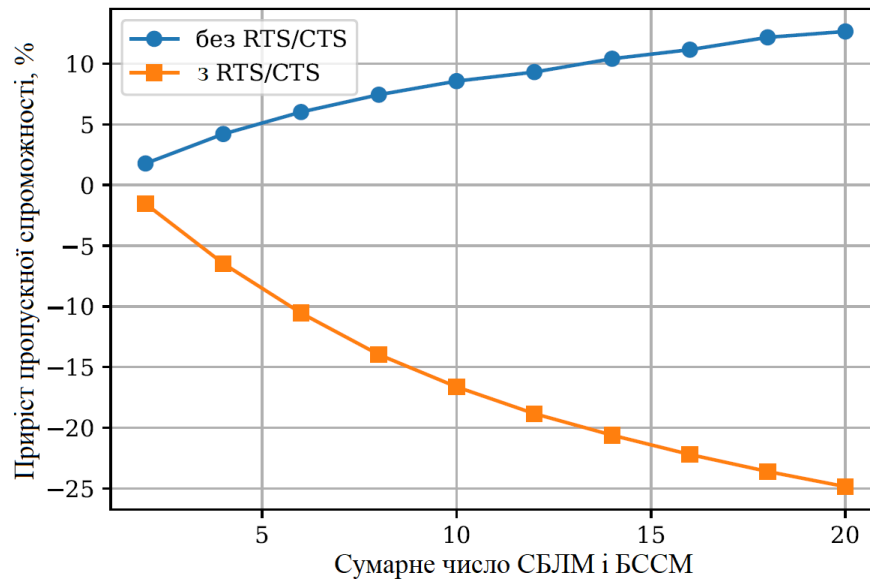


Рисунок 2.3 - Приріст сумарної пропускної спроможності обох мереж при рівній кількості СБЛМ та БССМ

### 2.3 Висновки до розділу 2

У другому розділі розроблена аналітична модель, що описує роботу системи з кількох БССМ і СБЛМ у загальному неліцензованому каналі, що дозволяє оцінити пропускну спроможність обох мереж. Дана модель розроблена для випадку, коли всі БССМ після закінчення процедури відстрочки передають резервуючий сигнал аж до наступної границі слотів в ліцензованому каналі і дозволяє врахувати відмінності методів доступу до загального каналу, які приводять, в тому числі, до асиметричних колізій БССМ і СБЛМ.

Модель дозволила оцінити справедливість розподілу каналних ресурсів між пристроями різних технологій. Згідно з отриманими результатами, використання резервуючого сигналу і значень параметрів, зазначених за умовчанням у відповідній специфікації/стандарті, призводить до несправедливого розподілу ресурсів з точки зору СБЛМ, причому пропускна

здатність бездротової локальної мережі в сценарії спільного існування знижується в два і більше разів порівняно з базовим сценарієм. Також було показано, що застосування механізму RTS/CTS у бездротових локальних мережах ще більше збільшує асиметричність розподілу каналних ресурсів, що говорить про істотний вплив асиметричних колізій на ефективність роботи СБЛМ при використанні цього механізму.

Таким чином, за допомогою розробленої моделі була показана, по-перше, необхідність розгляду реалізації методу доступу LBT без резервуючого сигналу і, по-друге, необхідність розробки методу виявлення та дозволу колізій БССМ. Як буде показано в розділах 3 і 4, обидва підходи можуть дозволити досягти більш справедливого поділу каналних ресурсів порівняно з базовим підходом, розглянутим у цьому розділі.

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ДОСТУПУ ДО ЗАГАЛЬНОГО КАНАЛУ БЕЗ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗЕРВУЮЧОГО СИГНАЛУ

Як було показано в розділі 2, використання резервуючого сигналу БССМ призводить до значного погіршення пропускної спроможності бездротової локальної мережі, що працює в тому ж частотному каналі. У цьому розділі буде розглянуто одне з рішень цієї проблеми, а саме — повна відмова від використання резервуючого сигналу.

Для аналізу продуктивності розглянутого рішення в цьому розділі розроблені дві аналітичні моделі. Зокрема, у розділі 3.1 описано модель роботи системи у припущенні використання ідеального (миттєвого) механізму визначення зайнятості середовища. Після цього у розділі 3.2 представлено узагальнення моделі у разі використання неідеального механізму визначення зайнятості середовища.

Для простоти викладу у цьому розділі розглядатимемо систему з  $N = 1$  БССМ і  $N_w = N$  СБЛМ.

Для зручності прочитання всі позначення, що використовуються у цьому розділі, показано у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Список основних позначень, що використовуються у розділі 3

Позначення	Опис
$\theta$	тривалість слоту в ліцензованому каналі
$\tau_w (\tau_l)$	ймовірність того, що обрана СБЛМ (БССМ) вибере поточний віртуальний слот для передачі
$W_{w,min}$ ( $W_{w,max}$ )	мінімальне (максимальне) значення конкурентного вікна СБЛМ

Продовження таблиці 3.1

$W_{l,min} (W_{l,max})$	мінімальне (максимальне) значення конкурентного вікна БССМ
$\rho_{w,c}$	ймовірність неуспішної спроби передачі СБЛМ за умови, що вона вибрала поточний слот для передачі
$\rho_{l,c}$	ймовірність невдачі доступу БССМ
$N$	число СБЛМ у аналізованій системі
$\sigma$	тривалість порожнього слота
$a_{w,i} (a_{l,i})$	середня тривалість спроби передачі номер $i+1$ СБЛМ (БССМ)
$T_{w,slot} (T_{l,slot})$	середня тривалість віртуального слоту СБЛМ (БССМ)
$S_w (S_l)$	пропускна спроможність бездротової локальної (стільникової) мережі
$T_l$	тривалість передачі БССМ
$T_{w,s}$	тривалість успішної передачі СБЛМ
$T_{w,c}$	тривалість неуспішної передачі СБЛМ
$d_w$	обсяг даних, що передаються СБЛМ за $T_{w,s}$ , у разі успішної передачі
$d_l$	обсяг даних, що передаються БССМ за $T_l$ у разі успішної передачі
$E_w (E_l)$	середня тривалість інтервалу між двома послідовними успішними передачами СБЛМ (БССМ)
$V_s$	середня тривалість вразливого інтервалу, що закінчується успішною передачею БССМ

### 3.1 Базова аналітична модель

#### 3.1.1 Припущення моделі

У цьому розділі при побудові моделі були використані припущення, аналогічні зробленим у розділі 2 (див. розділ 2.1.1).

Крім цього, в даному розділі будемо припускати, що і БССМ, і СБЛМ використовують ідеальний механізм визначення зайнятості каналу. Зокрема, називатимемо цей механізм ідеальним, якщо СБЛМ (БССМ) миттєво детектує початок передачі іншого пристрою. Зазначимо, що оскільки після закінчення процедури відстрочення БССМ починає працювати асинхронно з СБЛМ, при використанні введеного припущення колізії за участю СБЛМ та БССМ є малоймовірними, тому в даному розділі будемо ними нехтувати аналогічно роботі [85]. Іншими словами, СБЛМ (БССМ) завжди детектує початок передачі БССМ (СБЛМ), уникаючи таким чином колізії.

Нагадаємо, що згідно специфікації стільникових мереж LTE-LAA/NR-U конкурентне вікно СБЛМ підвищується тільки в тому випадку, якщо були пошкоджені дані, що передаються. У зв'язку з тим, що при використанні ідеального механізму прослуховування каналу колізії за участю БССМ та СБЛМ не відбуваються, а значить, значення конкурентного вікна БССМ завжди дорівнює мінімальному значенню  $W_{min}$ .

#### 3.1.2. Опис моделі

Назвемо інтервал між закінченням процедури відстрочення та найближчим кордоном слотів у ліцензованому каналі вразливим інтервалом.

Через те, що протягом уразливого інтервалу БССМ зупиняє свій лічильник відстрочки, тоді як СБЛМ продовжують відлік часу відстрочки, використовуваний у розділі 2 підхід не може бути використаний. Щоб побудувати аналітичну модель аналізованої у цьому розділі системи,

скористаємося іншим підходом, ідея якого було описано в [86]. Зокрема, щоб знайти пропускну здатність СБЛМ (БССМ), будемо оцінювати середню тривалість інтервалу  $E_w (E_l)$  між двома послідовними закінченнями успішних передач обраної СБЛМ (БССМ). У такому разі пропускну здатність  $S_w (S_l)$  бездротової локальної (стільникової) мережі визначається за допомогою наступних формул:

$$S_w = N \cdot \frac{d_w}{E_w}, \quad (3.1)$$

$$S_l = \frac{d_l}{E_l}, \quad (3.2)$$

де  $d_w (d_l)$ - це число байт, що передається СБЛМ (БССМ) протягом успішної (безколізійної) передачі.

Аналогічно роботі [86] у цьому розділі перевизначимо значення терміну віртуальний слот, який тепер позначатиме інтервал часу між двома послідовними відліками відстрочки обраної СБЛМ (БССМ) за умови, що значення її лічильника відстрочки не дорівнює нулю.

Після закінчення процедури відстрочення БССМ очікує найближчу межу слотів у ліцензованому каналі тобто, починається вразливий інтервал, див. рис. 3.1. Нехай  $\rho_{l,c}$  - це ймовірність невдачі доступу БССМ, яка відбувається, якщо БССМ завершила процедуру відстрочки, але виявила наприкінці вразливого інтервалу, що загальний канал зайнятий. Зазначимо, що в даному випадку згідно зі специфікацією [87] БССМ відмовляється від вчинення спроби передачі та повторює процедуру відстрочки, використовуючи поточне значення  $W$  конкурентного вікна.

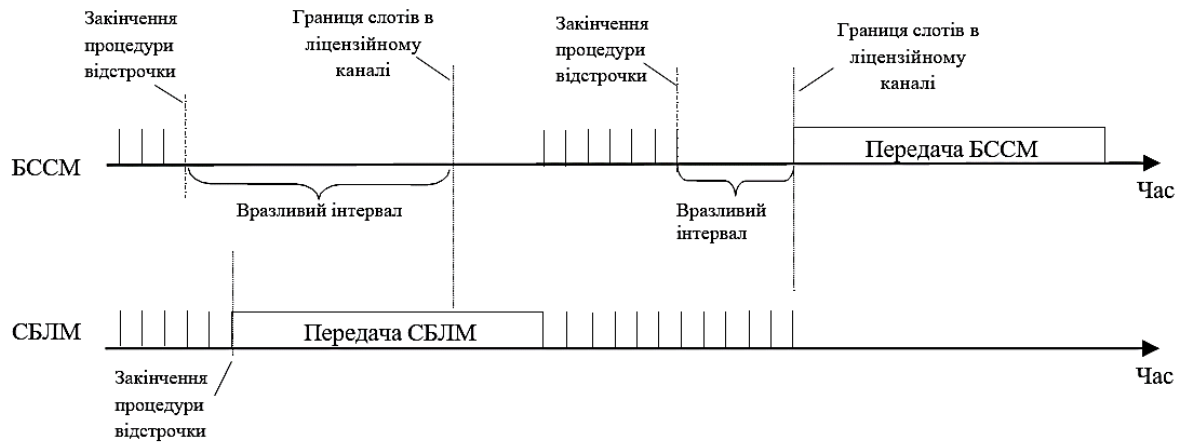


Рисунок 3.1 - Вразливий інтервал при використанні реалізації механізму LBT без сигналу

Крім того, введемо  $\rho_{w,c}$  - ймовірність колізії обраної СБЛМ за умови, що вона вибрала поточний слот для передачі.

Нехай  $a_{w,i}$  ( $a_{l,i}$ ) - це середня тривалість спроби передачі номер  $i$ , що здійснюється СБЛМ (БССМ). Спроба передачі СБЛМ складається з процедури відстрочення та передачі. У разі БССМ спроба передачі містить у собі вразливий інтервал або його частину. Використовуючи введені позначення, середню тривалість інтервалу між двома послідовними успішними передачами СБЛМ можна знайти наступним чином:

$$E_w = a_{w,1} + \sum_{i=2}^{\infty} a_{w,i} (\rho_{w,c})^{i-1}. \quad (3.3)$$

Аналогічно, середня тривалість інтервалу між двома послідовними успішними передачами БССМ дорівнює:

$$E_l = a_{l,1} + \sum_{i=2}^{\infty} a_{l,i} (\rho_{l,c})^{i-1}. \quad (3.4)$$

Оцінимо пропускну здатність  $S_w$  бездротової локальної мережі.

Перед спробою передачі номер СБЛМ у середньому відраховує  $(W_{w,i} - 1)/2$  віртуальних слотів відстрочки, де  $W_{w,i}$  — це значення конкурентного вікна при виконанні цієї спроби передачі, яке визначається таким чином:

$$W_{w,i} = \min(W_{w,min} \cdot 2^{i-1}, W_{w,max}), \quad (3.5)$$

де  $W_{w,min}$  ( $W_{w,max}$ ) - це мінімальне (максимальне) значення конкурентного вікна СБЛМ.

Після виконання процедури відстрочення обрана СБЛМ здійснює передачу даних, і відбувається одна з двох наступних подій:

1) жодна з інших СБЛМ не починає передачу (це відбувається з ймовірністю  $1 - \tau_w)^{N-1}$ ), а, отже, передача СБЛМ, що розглядається, завершується успіхом і займає  $T_{w,s}$  секунд;

2) хоча б одна з інших СБЛМ починає свою передачу (це відбувається з ймовірністю  $1 - (1 - \tau_w)^{N-1}$ ), і відбувається колізія, яка триватиме  $T_{w,c}$  секунд.

В результаті середня тривалість  $a_{w,i}$ , спроби передачі СБЛМ номер можна знайти таким чином:

$$a_{w,i} = \frac{W_{w,i} - 1}{2} T_{w,slot} + (1 - \tau_w)^{N-1} T_{w,s} + (1 - (1 - \tau_w)^{N-1}) T_{w,c}, \quad (3.6)$$

де  $T_{w,slot}$  - це середня тривалість віртуального слоту СБЛМ. Зазначимо, що у зв'язку з тим, що СБЛМ та БССМ відраховують слоти відстрочки асинхронно, середня тривалість віртуального слоту СБЛМ та БССМ буде різною (на відміну від випадку, що розглядається у розділі 2).

Введемо ймовірність того, що БССМ почне передачу даних після закінчення вразливого інтервалу. Це станеться, якщо БССМ завершить процедуру відстрочення (це трапиться з ймовірністю  $\tau_l$ ), і жодна із СБЛМ не почне передачу, яка перетне найближчу межу слотів у ліцензованому каналі (це трапиться з ймовірністю  $1 - \rho_{l,c}$ ):

$$\nu = \tau_l(1 - \rho_{l,c}). \quad (3.7)$$

У зв'язку з тим, що при використанні ідеального механізму визначення зайнятості каналу колізії за участю передач БССМ та СБЛМ неможливі,



конкурентне вікно БССМ залишається завжди рівним мінімальному значенню, отже, ймовірність  $\tau_l$  можна знайти так:

$$\tau_l = \frac{2}{W_{l,min} + 1}. \quad (3.8)$$

Знайдемо середню тривалість, віртуального слоту обраної СБЛМ. Віртуальні слоти СБЛМ можна розділити на такі категорії в залежності від їх тривалості:

- слоти тривалістю  $\sigma$ , які відбуваються, якщо жодна з інших СБЛМ, а також БССМ не вибрали цей слот для передачі (це відбувається з ймовірністю  $(1 - \tau_w)^{N-1}(1 - \nu)$ );
- слоти тривалістю  $T_{w,s}$ , які відбуваються, якщо рівно одна з інших СБЛМ обрала поточний слот для передачі (це відбувається з ймовірністю  $(N - 1)\tau_w(1 - \tau_w)^{N-2}$ );
- слоти тривалістю  $T_{w,c}$ , які відбуваються, якщо хоча б дві СБЛМ вибрали поточний слот для передачі і відбулася колізія (це відбувається з ймовірністю  $(1 - (N - 1)\tau_w(1 - \tau_w)^{N-2} - (1 - \tau_w)^{N-1})$ );
- слоти тривалістю  $T_l$ , які відбуваються, якщо жодна із СБЛМ не вибрала цей слот для передачі, а БССМ раніше завершила процедуру відстрочки і може розпочати передачу даних у цьому слоті (це відбувається з ймовірністю  $(1 - \tau_w)^{N-1}\nu$ ).

В результаті середню тривалість  $T_{w,slot}$ , віртуального слоту СБЛМ можна знайти наступним чином:

$$T_{w,slot} = (1 - \tau_w)^{N-1}(1 - \nu)\sigma + (1 - \tau_w)^{N-1}\nu T_l + (N - 1)\tau_w(1 - \tau_w)^{N-2}T_{w,s} + (1 - (N - 1)\tau_w(1 - \tau_w)^{N-2} - (1 - \tau_w)^{N-1})T_{w,c}. \quad (3.9)$$

За умови, що розглянута СБЛМ обрала поточний слот для передачі, колізія відбудеться з ймовірністю  $\rho_{w,c}$ , якщо хоча б одна з СБЛМ, що залишилися, також вибере поточний слот:

$$\rho_{w,c} = 1 - (1 - \tau_w)^{N-1}. \quad (3.10)$$

Для знаходження ймовірності того, що розглянута СБЛМ вибере поточний слот для передачі, скористаємося виразом (2.1) з розділу 2.

Застосувавши аналогічний підхід, оцінимо пропускну здатність  $S_l$  стільникової мережі. Спроба передачі БССМ номер починається з виконання процедури відстрочення.

Після неї відбудеться одна з двох наступних подій:

1) з ймовірністю  $1-\rho_{l,c}$  жодна із СБЛМ не почне передачу, що перетинає найближчу межу слотів у ліцензованому каналі і БССМ почне передачу даних в кінці вразливого інтервалу. Середню тривалість вразливого інтервалу за умови його успішного закінчення позначимо  $V_s$ ;

2) з ймовірністю  $\rho_{l,c}$  трапиться невдача доступу БССМ через те, що хоча б одна СБЛМ почне передачу, що перетинає найближчу межу слотів у ліцензованому каналі. Така передача може розпочатися в одному з таких випадків:

- з ймовірністю  $\xi_{c,1}$  через проміжок часу із середньою тривалістю  $V_{c,1}$  після початку вразливого інтервалу рівно одна СБЛМ почне передачу, що перетинає межу вразливого інтервалу, причому протягом цього проміжку відбудеться колізія двох СБЛМ;

- з ймовірністю  $\xi_{c,2}$  через проміжок часу з середньою тривалістю  $V_{c,2}$  після початку вразливого інтервалу рівно одна СБЛМ почне передачу, що перетинає межу вразливого інтервалу, причому протягом цього проміжку жодна СБЛМ не почне;

- З ймовірністю  $\xi_{c,3}$  через проміжок часу з середньою тривалістю  $V_{c,3}$  відбудеться колізія СБЛМ, яка перетне межу вразливого інтервалу;

- Імовірністю інших подій, що призводять до невдачі доступу БССМ, будемо нехтувати.

Зважаючи на той факт, що у разі невдачі доступу БССМ відмовляється від передачі і повторює процедуру відстрочки з поточним значенням  $W =$

$W_{l,min}$ , конкурентного вікна, середня тривалість  $a_{l,i}$ , спроби передачі БССМ номер виражається таким чином:

$$a_{l,i} = \frac{W_{l,min} - 1}{2} T_{l,slot} + (1 - \rho_{l,c})(V_s + T_i) + \rho_{l,c} \left[ \frac{\xi_{c,1}(V_{c,1} + T_{w,s}) + \xi_{c,2}(V_{c,2} + T_{w,s}) + \xi_{c,3}(V_{c,3} + T_{w,c})}{\xi_{c,1} + \xi_{c,2} + \xi_{c,3}} \right], \quad (3.11)$$

де  $T_{l,slot}$  - це середня тривалість віртуального слоту БССМ.

Знайдемо середню тривалість, віртуального слоту БССМ. Віртуальні слоти БССМ можна розділити на такі категорії в залежності від їх тривалості:

- слоти тривалістю  $\sigma$ , які відбуваються, якщо жодна із СБЛМ не вибрала цей слот для передачі (це трапляється з ймовірністю  $(1 - \tau_w)^N$ );
- слоти тривалістю  $T_{w,s}$ , які відбуваються, якщо одна з СБЛМ вибрала поточний слот для передачі (це трапляється з ймовірністю  $N\tau_w(1 - \tau_w)^{N-1}$ );
- слоти тривалістю  $T_{w,c}$ , які відбуваються, якщо хоча б дві СБЛМ вибрали поточний слот для передачі (це трапляється з ймовірністю  $(1 - (1 - \tau_w)^N - N\tau_w(1 - \tau_w)^{N-1})$ ).

В результаті середню тривалість  $T_{l,slot}$  віртуального слоту БССМ можна знайти наступним чином:

$$T_{l,slot} = (1 - \tau_w)^N \sigma + N\tau_w(1 - \tau_w)^{N-1} T_{w,s} + (1 - (1 - \tau_w)^N - N\tau_w(1 - \tau_w)^{N-1}) T_{w,c}. \quad (3.12)$$

Для того щоб знайти ймовірність невдачі доступу БССМ, скористаємося стаціонарним розподілом значення лічильника відстрочки СБЛМ, яке було знайдено в роботі [84]. Нагадаємо, що стаціонарну ймовірність  $b_{i,k}$  знаходження СБЛМ у стані з поточним значенням конкурентного вікна  $W = 2^i W_{min}$  та поточним значенням лічильника відстрочки можна знайти наступним чином:

$$b_{i,k} = \begin{cases} b_{0,0} \frac{W_{w,min} 2^{i-k}}{W_{w,min} 2^i} (\rho_{w,c})^i, & \text{если } k < W_{w,min} 2^i, \\ 0, & \end{cases} \quad (3.13)$$

$$b_{0,0} = \frac{2(1 - 2\rho_{w,c})(1 - \rho_{w,c})}{(1 - 2\rho_{w,c})(W_{w,min} + 1) + \rho_{w,c} W_{w,min} (1 - (2\rho_{w,c})^m)}. \quad (3.14)$$

Введемо ймовірність того, що у обраної СБЛМ поточне значення лічильника від терміну дорівнює  $f$ . Використовуючи стаціонарний розподіл  $\{b_{i,k}\}$ ,  $t_f$  можна знайти таким чином:

$$t_f = \sum_{i=0}^m b_{i,f}, \quad (3.15)$$

де  $m = \log_2(\lceil W_{w,max}/W_{w,min} \rceil)$  - це число різного значення конкурентного вікна СБЛМ.

Крім того, введемо ймовірність  $s_f$  того, що у обраної СБЛМ поточне значення лічильника відстрочки строго менше  $f$ , яке можна знайти наступним чином:

$$s_f = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{f-1} b_{i,k}. \quad (3.16)$$

Також будемо використовувати індикаторну величину  $\varrho$ , яка показує, чи може в межах вразливого інтервалу БССМ відбутися колізія кількох СБЛМ, яка закінчиться до їх закінчення. Визначимо її так:

$$\varrho = \begin{cases} 1, & \theta > T_{w,c} \\ 0, & \theta \leq T_{w,c}. \end{cases} \quad (3.17)$$

Інакше кажучи, в сценаріях  $\varrho$ , що розглядаються в даній роботі, дорівнює одиниці, якщо СБЛМ використовують механізм RTS/CTS, і дорівнює нулю, якщо СБЛМ його не використовують.

Знайдемо ймовірність  $\rho_{l,c}$  невдачі доступу БССМ. Нехай БССМ закінчила процедуру відстрочення, а тривалість вразливого інтервалу дорівнює  $t$ . Будемо використовувати такі додаткові позначення:

- 1)  $f = \lceil t/\sigma \rceil$  – це тривалість вразливого інтервалу, виражена в цілому числі слотів відстрочки;
- 2)  $C = \lceil Tw,c/\sigma \rceil$  – це тривалість колізії СБЛМ, виражена в цілому числі слотів відстрочки;

3)  $M = \lceil \theta / \sigma \rceil$  – це тривалість слоту в ліцензованому каналі виражена в цілому числі слотів відстрочки.

Таким чином, БССМ починає передачу після закінчення вразливого інтервалу в наступних випадках.

4) Якщо жодна із СБЛМ не розпочала передачу протягом уразливого інтервалу, тобто, в момент закінчення процедури відстрочення БССМ поточне значення лічильників відстрочки всіх СБЛМ було більше, ніж  $f$ . Така подія відбувається з ймовірністю  $(1 - s_{f+1})^N$ .

5) Якщо в межах уразливого інтервалу відбулася одна колізія рівно двох СБЛМ, але вона завершилася до закінчення. Це відбувається при виконанні наступних умов:

- СБЛМ використовують механізм RTS/CTS, тобто  $q = 1$ ;
- поточне значення лічильника відстрочки двох СБЛМ дорівнювало значенню  $k$ , причому повинна виконуватися нерівність  $k < f - C$ , інакше колізія не завершиться до закінчення вразливого інтервалу і не призведе до невдачі доступу;
- нові значення лічильника відстрочки, ініціалізовані за вищезазначеною колізією, виявилися більшими, ніж решта вразливого інтервалу, виражена в цілому числі слотів відстрочки (що відбувається з ймовірністю  $(1 - s_{f-k-C+1})^2$ );
- поточні значення лічильника відстрочки всіх СБЛМ, які не беруть участь у вищезазначеній колізії, на момент закінчення процедури відстрочення БССМ були більшими, ніж  $f - C + 1$  (що відбувається з ймовірністю  $(1 - s_{f-C+1})^{N-2}$ )

б) Якщо в межах вразливого інтервалу відбулася або одна колізія трьох або більше СБЛМ або дві або більше колізій СБЛМ, але вони завершилися до його закінчення. У зв'язку з тим, що ймовірність настання цих подій мала в порівнянні з імовірністю двох вищеописаних подій, при розрахунку  $\rho_{l,c}$  ймовірністю цих подій будемо нехтувати.

В результаті, ймовірність  $\rho_{l,c}$  невдачі доступу БССМ можна знайти наступним чином:

$$\rho_{l,c} = 1 - \sum_{f=0}^M \frac{1}{M+1} \left( (1 - s_{f+1})^N + \varrho \sum_{k=0}^{f-C} \binom{N}{2} t_{k-1}^2 (1 - s_{f-C+1})^{N-2} (1 - s_{f-k-C+1})^2 \right). \quad (3.18)$$

Оцінимо середню тривалість  $V$  вразливого інтервалу, що закінчується успішною передачею БССМ.

БССМ починає передачу даних після закінчення вразливого інтервалу в наступних випадках:

- якщо жодна СБЛМ не розпочала передачу протягом уразливого інтервалу (що відбувається з ймовірністю  $\xi_{s,1}$ ). У цьому випадку середня тривалість вразливого інтервалу дорівнюватиме  $V_{s,1}$ ;
- якщо в межах уразливого інтервалу відбулася колізія двох СБЛМ, але вона завершилася до закінчення (що відбувається з ймовірністю  $\xi_{s,2}$ ). У цьому випадку середня тривалість вразливого інтервалу дорівнюватиме  $V_{s,2}$ ;
- якщо в межах вразливого інтервалу відбулася або одна колізія трьох або більше СБЛМ, або дві або більше колізій СБЛМ, але вони завершилися до закінчення вразливого інтервалу. Як і у випадку зі знаходженням  $\rho_{l,c}$ , ймовірністю наступу цих подій будемо нехтувати.

Використовуючи введені позначення, середню тривалість  $V_s$  вразливого інтервалу, що закінчується успішною передачею БССМ, можна знайти таким чином:

$$V_s = \frac{\xi_{s,1} V_{s,1} + \xi_{s,2} V_{s,2}}{\xi_{s,1} + \xi_{s,2}}. \quad (3.19)$$

Знайдемо ймовірність  $\xi_{s,1}$  та відповідну середню тривалість  $V_{s,1}$  вразливого інтервалу. Жодна з СБЛМ не почне передачу протягом уразливого інтервалу тривалістю  $f$ , якщо значення лічильників відстрочки всіх СБЛМ на момент закінчення процедури відстрочення БССМ будуть більшими:

$$\xi_{s,1} = \frac{1}{M+1} \sum_{f=0}^M (1 - s_{f+1})^N, \quad (3.20)$$

$$V_{s,1} = \frac{\frac{1}{M+1} \sum_{f=0}^M (f + \frac{1}{2}) \sigma (1 - s_{f+1})^N}{\xi_{s,1}}. \quad (3.21)$$

Перейдемо до знаходження ймовірності  $\xi_{s,2}$  та відповідної середньої тривалості  $V_{s,2}$  вразливого інтервалу. Як і при підрахунку  $\rho l^c$ ,

$$\xi_{s,2} = \varrho \frac{1}{M+1} \sum_{f=0}^M \sum_{k=0}^{f-C} \binom{N}{2} t_{k-1}^2 (1 - s_{f-C+1})^{N-2} (1 - s_{f-k-C+1})^2, \quad (3.22)$$

$$V_{s,2} = \frac{\varrho \frac{1}{M+1} \sum_{f=0}^M (f + \frac{1}{2}) \sigma \sum_{k=0}^{f-C} \binom{N}{2} t_{k-1}^2 (1 - s_{f-C+1})^{N-2} (1 - s_{f-k-C+1})^2}{\xi_{s,2}}. \quad (3.23)$$

Перейдемо до знаходження ймовірностей  $\xi_{c,1}$ ,  $\xi_{c,2}$  і  $\xi_{c,3}$  подій, що призводять до невдачі доступу БССМ, а також відповідних проміжків часу  $V_{c,1}$ ,  $V_{c,2}$  і  $V_{c,3}$  між початком вразливого інтервалу та відповідною подією. Як спрощення при знаходженні цих величин будемо вважати, що ймовірність передачі СБЛМ у віртуальному слоті не залежить від його положення щодо початку вразливого інтервалу.

Знайдемо ймовірність  $\xi_{c,1}$ . Подія, що відповідає даній ймовірності, відбудеться, якщо будуть виконані такі умови:

- СБЛМ використовують механізм RTS/CTS, тобто  $\varrho = 1$ ;
- тривалість вразливого інтервалу, виражена у слотах відстрочки, становить не менше  $C$ ;
- всі СБЛМ спочатку відраховують порожніх слотів (що відбувається з ймовірністю  $(1 - \tau_w)^{jN}$ );
- після цього відбувається колізія СБЛМ, ймовірність якої  $(1 - (1 - \tau_w)^{N-N\tau_w}(1 - \tau_w)^{N-1})$
- потім усі СБЛМ відраховують  $k$  порожніх слотів (що відбувається з ймовірністю  $(1 - \tau_w)^{kN}$ );

– рівно одна СБЛМ закінчує процедуру відстрочки і починає передачу, яка перетинає межу вразливого інтервалу (що відбувається з ймовірністю  $N\tau_w(1 - \tau_w)^{N-1}$ ).

Зауважимо, що тривалість інтервалу часу до початку передачі, що перетинає межу вразливого інтервалу, при цьому дорівнює  $(j+k)\sigma + T_{w,c}$ . Підсумувавши за всіма можливими значеннями  $i, j, k$ , можна отримати ймовірність  $\xi_{c,1}$  і середню тривалість інтервалу  $V_{c,1}$  наступним чином:

$$\xi_{c,1} = \varrho \frac{1}{M+1} \sum_{i=C}^M \sum_{j=0}^{i-C} \sum_{k=0}^{i-j-C} (1 - \tau_w)^{jN} (1 - (1 - \tau_w)^N - N\tau_w(1 - \tau_w)^{N-1}) \cdot (1 - \tau_w)^{kN} N\tau_w(1 - \tau_w)^{N-1}, \quad (3.24)$$

$$V_{c,1} = \left[ \varrho \frac{1}{M+1} \sum_{i=C}^M \sum_{j=0}^{i-C} \sum_{k=0}^{i-j-C} (1 - \tau_w)^{jN} (1 - (1 - \tau_w)^N - N\tau_w(1 - \tau_w)^{N-1}) \cdot (1 - \tau_w)^{kN} N\tau_w(1 - \tau_w)^{N-1} ((j+k)\sigma + T_{w,c}) \right] / \xi_{c,1}. \quad (3.25)$$

Знайдемо ймовірність  $\xi_{c,2}$ . Подія, що відповідає даній ймовірності, відбудеться, якщо будуть виконані такі умови:

- всі СБЛМ спочатку відраховують порожніх слотів (що відбувається з ймовірністю  $(1 - \tau_w)^{jN}$ );
- після цього рівно одна СБЛМ закінчує процедуру відстрочки та починає передачу, яка перетинає межу вразливого інтервалу (що відбувається з ймовірністю  $N\tau_w(1 - \tau_w)^{N-1}$ ).

Тривалість інтервалу часу до початку передачі, що перетинає межу вразливості інтервалу, при цьому дорівнює  $j\sigma$ . Просумувавши за всіма можливими значеннями тривалості вразливого інтервалу  $i$ , а також по  $j$ , отримаємо ймовірність  $\xi_{c,2}$  і середню тривалість інтервалу  $V_{c,2}$  наступним чином:



$$\xi_{c,2} = \frac{1}{M+1} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^i (1 - \tau_w)^{jN} N \tau_w (1 - \tau_w)^{N-1}, \quad (3.26)$$

$$V_{c,2} = \left[ \frac{1}{M+1} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^i (1 - \tau_w)^{jN} N \tau_w (1 - \tau_w)^{N-1} j \sigma \right] / \xi_{c,2}. \quad (3.27)$$

Знайдемо ймовірність  $\xi_{c,3}$ . Подія, що відповідає даній ймовірності, відбудеться, якщо будуть виконані такі умови:

- всі СБЛМ спочатку відраховують  $j$  порожніх слотів (що відбувається з ймовірністю  $(1 - \tau_w)^{jN}$ );
- після цього відбувається колізія СБЛМ, яка перетинає межу вразливого інтервалу (що відбувається з ймовірністю  $(1 - (1 - \tau_w)^N - N \tau_w (1 - \tau_w)^{N-1})$ ).

Тривалість інтервалу часу до початку колізії, що перетинає кордон вразливого інтервалу, при цьому дорівнюватиме  $j\sigma$ . Зауважимо, що під час використання RTS/CTS має виконуватися нерівність  $j > i - C$ , інакше колізія закінчиться до закінчення вразливого інтервалу і призведе до невдачі доступу БССМ. Просумувавши за всіма можливими значеннями тривалості вразливого інтервалу  $i$ , а також по  $j$ , отримаємо ймовірність  $\xi_{c,3}$  і середню тривалість інтервалу  $V_{c,3}$  наступним чином:

$$\xi_{c,3} = \frac{1}{M+1} \sum_{i=0}^M \sum_{j=\rho(i-C)}^i (1 - \tau_w)^{jN} N \tau_w (1 - \tau_w)^{N-1}, \quad (3.28)$$

$$V_{c,3} = \left[ \frac{1}{M+1} \sum_{i=0}^M \sum_{j=\rho(i-C)}^i (1 - \tau_w)^{jN} N \tau_w (1 - \tau_w)^{N-1} j \sigma \right] / \xi_{c,3}. \quad (3.29)$$

У результаті знайдено всі допоміжні величини, необхідні для обчислення пропускних здібностей бездротової локальної та стільникових мереж за формулами (3.3) та (3.4), відповідно.

### 3.1.3 Чисельні результати

Якщо явно не обумовлено зворотне, у даному розділі використовуються значення параметрів моделі, подані в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Значення параметрів у розділі 3.1

Параметр	Значення
$W_{min}$	16
$W_{max}$	1024
$T_l$	8 мс
$T_w$	2,5 мс
$\sigma$	9 мкс
$\theta$	1000 мкс
$d_w$	155 Кбіт
$d_l$	500 Кбіт

Для оцінки точності отриманої аналітичної моделі було проведено порівняння з імітаційною моделлю, в якій не використовувався ряд припущень аналітичної моделі, у тому числі — припущення про рівномірний розподіл тривалості вразливого інтервалу на інтервалі  $[0, \theta)$ . Порівняння було проведено у широкому діапазоні сценаріїв та показало, що відносна похибка аналітичної моделі не перевищує 5 % (див. рис. 3.2 як один із прикладів).

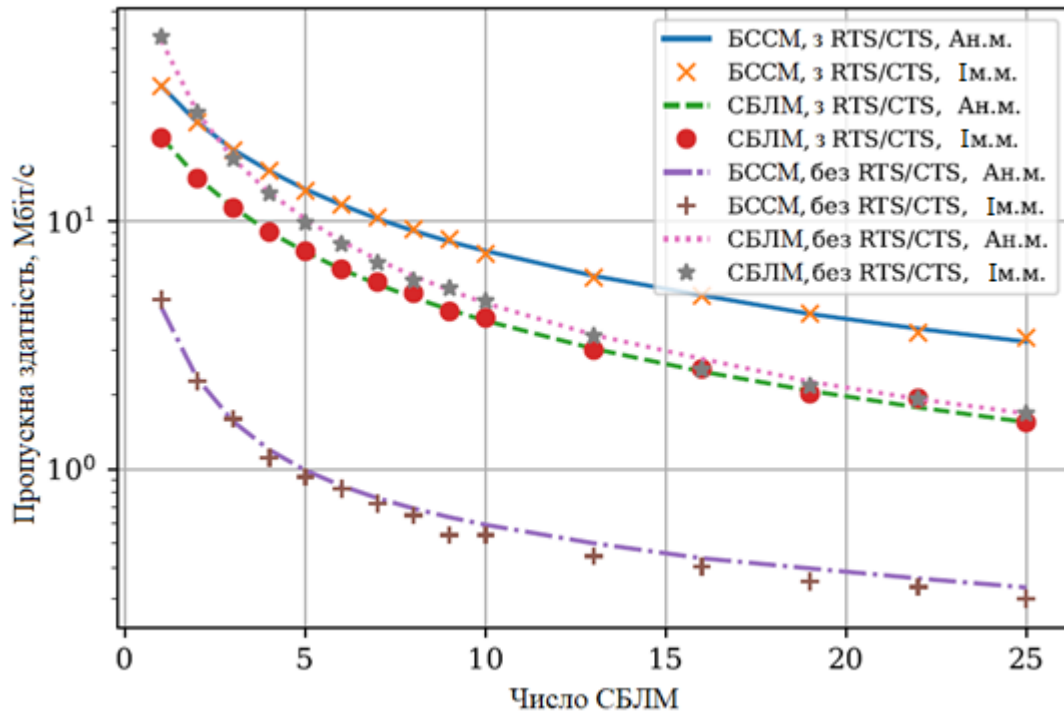


Рисунок 3.2 - Порівняння аналітичної (“Ан.м.”) та імітаційної (“Ім.м.”) моделі при використанні ідеального механізму визначення зайнятості каналу

Спочатку розглянемо сценарій, у якому СБЛМ не використовують механізм RTS/CTS, див. рис. 3.3, 3.4. Коли БССМ використовує резервуючий сигнал, пропускна здатність СБЛМ помітно знижується, про що говорить її негативний приріст (до -45%) по відношенню до базового сценарію. У разі використання БССМ методу доступу без резервуючого сигналу пропускна здатність СБЛМ помітно збільшується, і в більшості випадків приріст пропускної спроможності виявляється позитивним і зростає при збільшенні  $\theta$ .

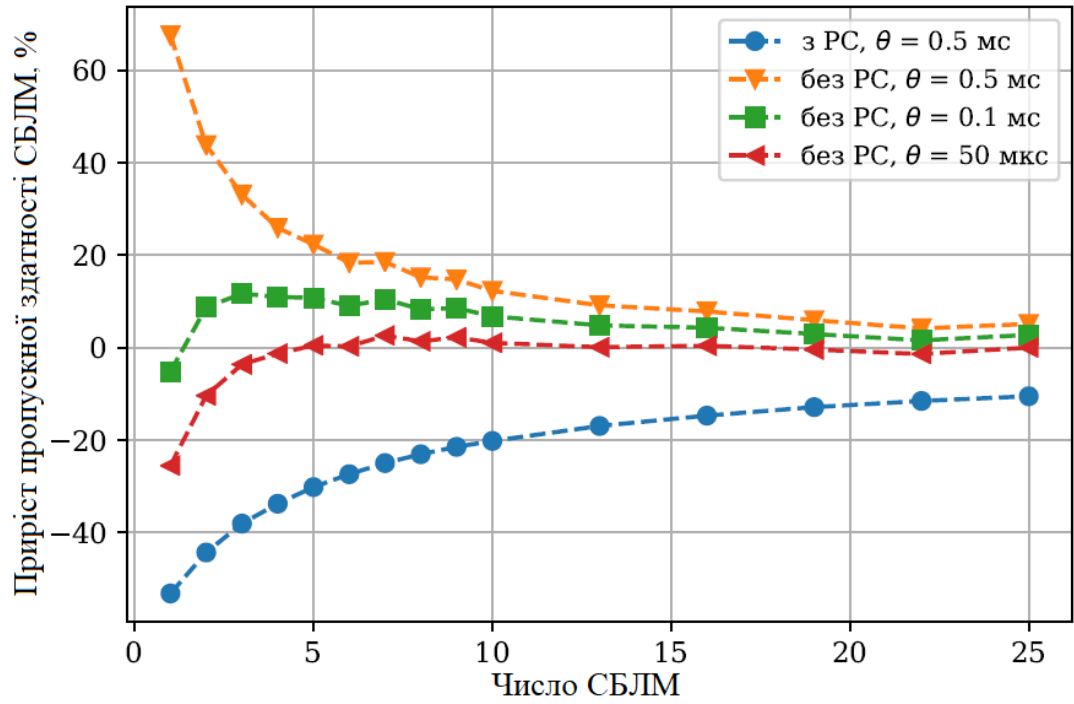


Рисунок 3.3 - Приріст пропускної спроможності СБЛМ без механізму RTS/CTS

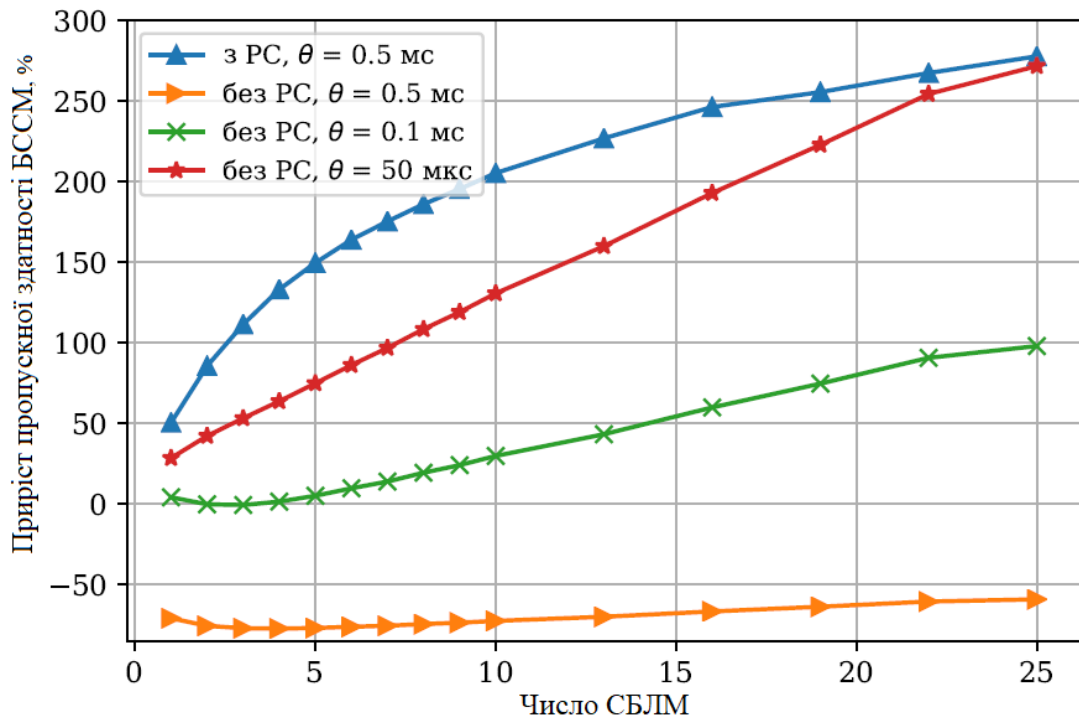


Рисунок 3.4 - Приріст пропускної спроможності БССМ без механізму RTS/CTS

Пропускна здатність БССМ при використанні методу доступу з резервуючим сигналом виявляється значно вищою за пропускну спроможність СБЛМ у базовому сценарії, тобто, приріст пропускної спроможності є позитивним. Більше того, її зростання залишається позитивним при використанні методу доступу без резервуючого сигналу, але тільки за умови, що тривалість слоту в ліцензованому каналі менше ніж 100 мкс.

Перейдемо до розгляду сценарію, де СБЛМ використовують механізм RTS/CTS, див. рис. 3.5–3.6. Загалом результати схожі з попереднім випадком, за винятком двох моментів. По-перше, при використанні методу доступу з сигналом, що резервує пропускна здатність СБЛМ знижується більш ніж удвічі в усіх розглянутих точках. По-друге, позитивний приріст пропускної спроможності СБЛМ спостерігається, тільки якщо використовується тривалість слотів у ліцензованому каналі більше 100 мкс.

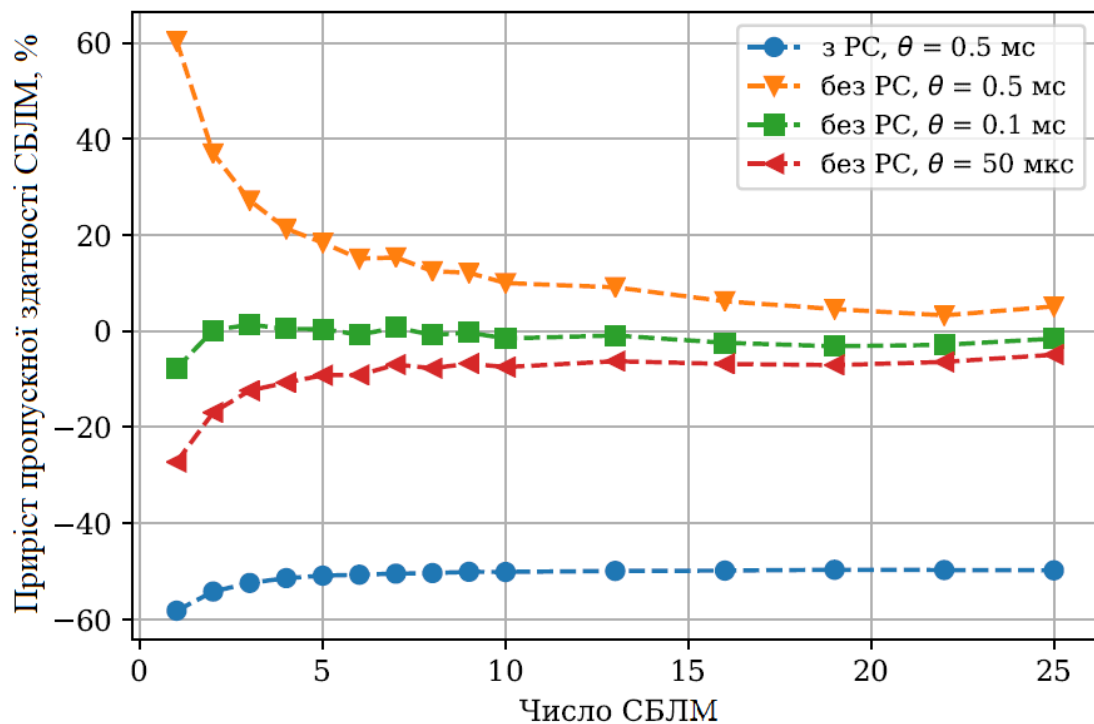


Рисунок 3.5 - Приріст пропускної спроможності СБЛМ з механізмом RTS/CTS

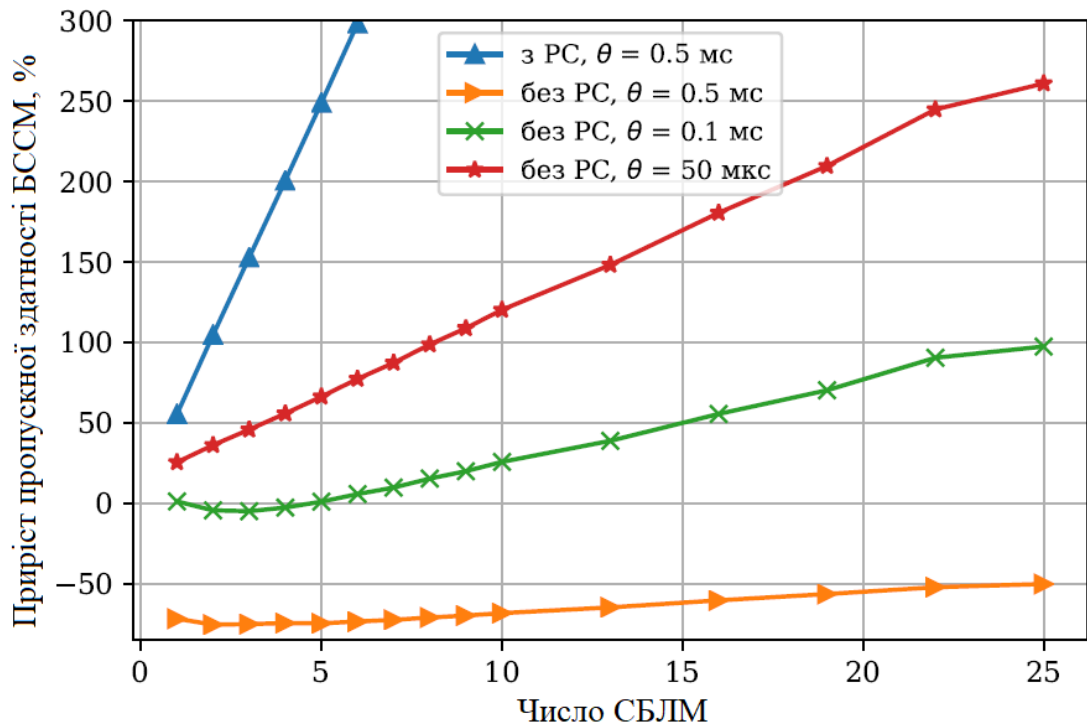


Рисунок 3.6 - Приріст пропускної спроможності БССМ з механізмом RTS/CTS

### 3.2 Врахування неідеальності механізму прослуховування середовища

#### 3.2.1 Припущення моделі

У цьому розділі при побудові моделі були використані всі припущення, зроблені у розділі 3.1, за винятком припущення використання ідеального механізму визначення зайнятості каналу.

Вважатимемо, що якщо передача СБЛМ почалася менш ніж за  $\sigma$  до кінця вразливого інтервалу, то з ймовірністю  $P$  БССМ не встигне задетектувати початок передачі СБЛМ і теж почне передачу, що призведе до колізії. Аналогічно вважатимемо, що якщо БССМ починає передачу менш ніж за  $\sigma$  до завершення останнього слоту відстрочки СБЛМ, то ця СБЛМ також не встигне задетектувати початок передачі БССМ з тією ж ймовірністю.

Для спрощення викладу в даному розділі розглядатимемо лише випадок, коли в бездротовій локальній мережі механізм RTS/CTS не використовується, і, як наслідок,  $T_{w,c} = T_{w,s} = T_w$ .

### 3.2.2 Опис моделі

Для моделювання аналізованої системи скористаємося підходом, аналогічним використаному в розділі 3.1. Відповідно до нього пропускну здатність  $S_w$  безпроводової локальної мережі виражається таким чином:

$$S_w = N \frac{d_w}{E_w}, \quad (3.30)$$

де  $E_w$  — це середня тривалість інтервалу між закінченнями двох послідовних успішних передач обраної СБЛМ, яка визначається так само, як і в розділі 3.1:

$$E_w = a_{w,1} + \sum_{i=2}^{\infty} a_{w,i} (\rho_{w,c})^{i-1}, \quad (3.31)$$

де  $a_{w,i}$  - це середня тривалість спроби передачі номер  $i$  СБЛМ, а  $\rho_{w,c}$  - це ймовірність неуспішної передачі СБЛМ за умови, що вона почала передачу в даному слоті. У даній моделі при підрахунку  $a_{w,i}$ , враховується, що у разі колізії СБЛМ і БССМ, нова спроба передачі СБЛМ починається в момент закінчення передачі БССМ, оскільки передача БССМ довша за передачу СБЛМ, а процедура відстрочки починається тільки тоді, коли канал знову стає вільним.

Зазначимо, що при використанні неідеального механізму визначення зайнятості каналу колізія СБЛМ та БССМ може статися у двох випадках:

- якщо СБЛМ почне свою передачу на початку слоту, віддаленого менш ніж  $\sigma$  від межі слотів у ліцензованому каналі, на якій БССМ запланувала початок своєї передачі, а БССМ, у свою чергу, не зможе детектувати початок цієї передачі СБЛМ. Такий слот далі називатимемо колізійним слотом першого типу;

– якщо СБЛМ вибере для передачі слот відстрочки, початок якого перебуває менше ніж через  $\sigma$  після початку передачі БССМ, і ця СБЛМ не зможе задетектувати початок передачі БССМ. Такий слот далі називатимемо колізійним слотом другого типу.

Для знаходження компонент формул (3.30) і (3.31) необхідно підрахувати, з якою ймовірністю хоча б одна СБЛМ почне передачу протягом вразливого інтервалу, а також колізійних слотах першого і другого типів. Введемо такі позначення:

- $\rho_{l,1}$  - це ймовірність того, що хоча б одна СБЛМ почне передачу протягом уразливого інтервалу;
- $\rho_{l,2}$  - це ймовірність того, що хоча б одна СБЛМ почне передачу в колізійному слоті першого типу;
- $\rho_{l,3}$  - це ймовірність того, що хоча б одна СБЛМ почне передачу в колізійному слоті другого типу.

Для знаходження ймовірностей  $\rho_{l,1}$ ,  $\rho_{l,2}$ ,  $\rho_{l,3}$  скористаємось ймовірністю  $s_f$  того, що поточне значення лічильника відстрочки строго менше  $f$ , яка була знайдена в розділі 3.1 та задається формулою (3.16).

Знайдемо ймовірність  $\rho_{l,1}$ . Жодна СБЛМ не почне передачу протягом уразливого інтервалу БССМ, якщо значення лічильників відстрочки всіх СБЛМ на момент початку уразливого інтервалу буде більшим, ніж його тривалість, виражена в цілому числі слотів відстрочки  $\sigma$ . Усереднивши за тривалістю вразливого інтервалу, що має рівномірний розподіл, отримуємо, що

$$\rho_{l,1} = 1 - \frac{1}{M+1} \sum_{f=0}^M (1 - s_{f+1})^N, \quad (3.32)$$

де  $M = \lceil \theta/\sigma \rceil$  — це тривалість слоту в ліцензованому каналі, виражена в цілому числі слотів відстрочки  $\sigma$ .



Ймовірність  $\rho_{l,2}$  того, що хоча б одна СБЛМ вибере для передачі колізійний слот першого типу (він починається через  $f \sigma$  після початку вразливого інтервалу), можна знайти наступним чином:

$$\rho_{l,2} = \frac{1}{M+1} \sum_{f=0}^M [(1-s_f)^N - (1-s_{f+1})^N]. \quad (3.33)$$

Аналогічно знайдемо ймовірність  $\rho_{l,3}$  того, що хоча б одна СБЛМ вибере для передачі колізійний слот другого типу, який починається через  $(f+1)\sigma$  після початку вразливого інтервалу:

$$\rho_{l,3} = \frac{1}{M+1} \sum_{f=0}^M [(1-s_{f+1})^N - (1-s_{f+2})^N]. \quad (3.34)$$

Знайдемо середню тривалість  $a_{w,i}$  спроби передачі номера обраної СБЛМ. Спроба передачі СБЛМ починається з процедури відстрочки, що складається в середньому з  $(W_{w,i} - 1)/2$  віртуальних слотів із середньою тривалістю  $T_{w,slot}$ . Після закінчення процедури відстрочки СБЛМ починає передачу даних.

Ця спроба передачі закінчиться через  $T_l$ , якщо відбудеться колізія з БССМ. Це відбувається у двох випадках:

- якщо ця спроба передачі почалася в колізійному слоті першого типу (це відбувається з ймовірністю  $\tau_l(1-(\rho_{l,1}-\rho_{l,2}))$ ) та БССМ її не задетектувала (це відбудеться з ймовірністю  $P$ );
- якщо ця спроба передачі почалася в колізійному слоті другого типу (це відбувається з ймовірністю  $\tau_l(1 - \rho_{l,1})$ ) і СБЛМ не задетектувала передачу БССМ, що почалася перед цим (це відбудеться з ймовірністю  $P$ ).

В інших випадках, тобто, з ймовірністю  $(1-P\tau_l(1-(\rho_{l,1}-\rho_{l,2}))-P\tau_l(1-\rho_{l,1}))$  спроба передачі закінчиться через  $T_w$ .

У результаті, середню тривалість  $a_{w,i}$  спроби передачі номер СБЛМ можна знайти наступним чином:

$$a_{w,i} = \frac{W_{w,i} - 1}{2} T_{w,slot} + P\tau_l(1 - (\rho_{l,1} - \rho_{l,2}))T_l + P\tau_l(1 - \rho_{l,1})T_l + (1 - P\tau_l(1 - (\rho_{l,1} - \rho_{l,2})) - P\tau_l(1 - \rho_{l,1}))T_w. \quad (3.35)$$

Знайдемо ймовірність  $\rho_{w,c}$ . Спроба передачі обраної СБЛМ завершиться невдачею, якщо ще хоча б одна з СБЛМ, що залишилися, також почне передачу (це відбудеться з ймовірністю  $1 - (1 - \tau_w)^{N-1}$ ), або якщо відбудеться колізія з БССМ (це відбудеться з ймовірністю  $P\tau_l(1 - (\rho_{l,1} - \rho_{l,2})) + P\tau_l(1 - \rho_{l,1})$ , яка була знайдена вище за підрахунок  $a_{w,i}$ ). Для спрощення моделі вважатимемо, що колізія обраної СБЛМ одночасно з іншою СБЛМ та БССМ є малоймовірною, а, отже, можна вважати ці події несумісними та знайти  $\rho_{w,c}$  наступним чином:

$$\rho_{w,c} = 1 - (1 - \tau_w)^{N-1} + P\tau_l(1 - (\rho_{l,1} - \rho_{l,2})) + P\tau_l(1 - \rho_{l,1}). \quad (3.36)$$

Знайдемо середню тривалість  $T_{w,slot}$  віртуального слоту СБЛМ. Віртуальні слоти СБЛМ можна розділити на такі категорії в залежності від їхньої тривалості:

- слоти тривалістю  $T_l$ , які відбуваються, якщо БССМ закінчила раніше процедуру відстрочення (що відбувається з ймовірністю  $\tau_l$ ) і не відклала свою передачу через невдачу доступу протягом вразливого інтервалу (що відбувається з ймовірністю  $(1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2}))$ );
- слоти тривалістю  $T_w$ , які відбуваються, якщо хоча б одна СБЛМ закінчила процедуру відстрочення в поточному слоті (це трапляється з ймовірністю  $(1 - (1 - \tau_w)^{N-1})$ ), а БССМ з якоїсь причини не стала починати передачу (це відбувається з ймовірністю  $(1 - \tau_l(1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2})))$ );
- слоти тривалістю  $\sigma$ , які відбуваються, якщо жодна з СБЛМ, що залишилися, ні БССМ не вирішили розпочати передачу в цьому слоті (це відбувається з ймовірністю  $(1 - \tau_w)^{N-1}(1 - \tau_l(1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2})))$ ).

В результаті середню тривалість  $T_{w,slot}$  віртуального слоту СБЛМ можна знайти наступним чином:

$$T_{w,slot} = (1 - \tau_w)^{N-1}(1 - \pi_l(1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2})))\sigma + \pi_l(1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2}))T_l + \\ + (1 - \pi_l(1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2}))) (1 - (1 - \tau_w)^{N-1})T_w. \quad (3.37)$$

Знайдемо ймовірність  $\tau_w$  того, що СБЛМ закінчить процедуру відстрочення в даному слоті. Для цього порахуємо відношення середньої кількості спроб передачі у розрахунку на одну успішну передачу СБЛМ і поділимо на суму  $m$  та середньої кількості  $n$  слотів відстрочки, що відраховуються перед усіма спробами передачі. Відповідно до введених позначень,  $\rho_{w,c}$  - це ймовірність неуспішної спроби передачі за умови, що СБЛМ почала передачу, а отже середня кількість  $m$  спроб передачі дорівнює  $1/(1 - \rho_{w,c})$ . Таким чином,  $\tau_w$  набуває такого вигляду:

$$\tau_w = \frac{m}{m + n} = \frac{\frac{1}{1 - \rho_{w,c}}}{\frac{1}{1 - \rho_{w,c}} + \sum_{i=0}^{\infty} \frac{W_i^W - 1}{2} (\rho_{w,c})^i}. \quad (3.38)$$

Перейдемо до знаходження пропускної спроможності  $S_l$  стільникової мережі.

Будемо називати спробу передачі БССМ успішною, тільки якщо дані, що передаються, не пошкоджені колізією з передачею СБЛМ. Якщо БССМ почала передачу даних, то вони виявляється пошкоджені колізією з СБЛМ з ймовірністю  $P(\rho_{l,2} + \rho_{l,3})$ , а, отже, в середньому на одну успішну передачу БССМ доводиться  $P(\rho_{l,2} + \rho_{l,3})/(1 - P(\rho_{l,2} + \rho_{l,3}))$  пошкоджених. При цьому слід врахувати, що у разі колізії непошкоджена частина передачі БССМ, яка має тривалість  $T_l - T_w$ , успішно декодується приймачем. Таким чином, пропускну здатність  $S_l$  БССМ можна знайти таким чином:

$$S_l = \frac{d_l}{E_l} \left( 1 + \frac{P(\rho_{l,2} + \rho_{l,3})}{1 - P(\rho_{l,2} + \rho_{l,3})} \frac{T_l - T_w}{T_l} \right), \quad (3.39)$$

де  $E_l$  - це середня тривалість інтервалу між закінченнями двох послідовних успішних передач БССМ.

Якщо БССМ закінчила процедуру відстрочення, то невдача доступу відбудеться з ймовірністю  $\rho_{l,1} - P\rho_{l,2}$ , якщо хоча б одна СБЛМ почне передачу протягом уразливого інтервалу і БССМ зможе її задетектувати. Нагадаємо, що

у разі невдачі доступу БССМ відмовляється від поточної спроби передачі та повторює процедуру відстрочки, тобто, БССМ після закінчення вразливого інтервалу в середньому лише один раз з  $1/(1-(\rho_{l,1}-P\rho_{l,2}))$  спроб починає передачу даних.

Якщо БССМ після вдалого доступу до каналу почала передачу даних (це відбувається з ймовірністю  $1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2})$ ), то дані виявляються пошкоджені колізією з передачею СБЛМ з ймовірністю  $P(\rho_{l,2} + \rho_{l,3})$ . У результаті середня тривалість  $E_l$  інтервалу між закінченнями двох послідовних успішних передач БССМ виражається так:

$$E_l = \left[ a_{l,0} + \sum_{i=1}^{\infty} a_{l,i} \left( \frac{P(\rho_{l,2} + \rho_{l,3})}{1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2})} \right)^i \right] \frac{1}{1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2})}. \quad (3.40)$$

де  $a_{l,i}$  - це середня тривалість спроби передачі БССМ з поточним значенням конкурентного вікна рівним  $W_{l,i} = \min(2^i W_{l,min}, W_{l,max})$ . Така спроба починається з процедури відстрочки, що складається в середньому з  $(W_{l,i} - 1)/2$  віртуальних слотів із середньою тривалістю  $T_{l,slot}$ , після якої починається вразливий інтервал. Якщо протягом уразливого інтервалу трапляється невдача доступу БССМ (у середньому через  $V_c$  після його початку), то спроба передачі закінчується передачею СБЛМ. В іншому випадку, через у середньому  $V_s$  після початку вразливого інтервалу БССМ починає свою передачу тривалістю  $T_l$ .

У результаті середня тривалість  $a_{l,i}$  спроби передачі БССМ виражається наступним чином:

$$a_{l,i} = \frac{W_{l,i} - 1}{2} T_{l,slot} + (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2})(V_c + T_w) + (1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2}))(V_s + T_l). \quad (3.41)$$

Знайдемо середню тривалість  $T_{l,slot}$ , віртуального слоту БССМ. Віртуальний слот має тривалість  $T_w$ , якщо хоча б одна СБЛМ почала передачу на його початку (це відбувається з ймовірністю  $(1 - (1 - \tau_w)^N)$ ). В іншому випадку, віртуальний слот має тривалість  $\sigma$  (це відбувається з ймовірністю  $(1 - \tau_w)^N$ ). Отже,  $T_{l,slot}$  можна знайти таким чином:

$$T_{l,slot} = (1 - \tau_w)^N \sigma + (1 - (1 - \tau_w)^N) T_w. \quad (3.42)$$

Ймовірність  $\tau_l$  того, що БССМ закінчить процедуру відстрочки в поточному слоті, знайдемо аналогічно  $\tau_w$ . БССМ або не передає дані наприкінці вразливого інтервалу через відмову доступу, або відбувається колізія з ймовірністю  $\rho^{L_1} + P\rho^{L_3}$ , а, отже, середнє число  $m$  спроб передачі дорівнює  $1/(1 - (\rho_{l,1} + P\rho_{l,3}))$ . Зважаючи на те, що через невдачі доступу БССМ в середньому робить  $1/(1 - (\rho^{L_1} - P\rho^{L_2}))$  спроб при використанні конкурентного вікна  $W_{l,i}$ , та підвищує вікно при колізії з СБЛМ, яка відбувається з ймовірністю  $(P(\rho_{l,2} + \rho_{l,3}))/1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2})$ , отримуємо, що

$$\tau_l = \frac{\frac{1}{1 - (\rho_{l,1} + P\rho_{l,3})}}{\frac{1}{1 - (\rho_{l,1} + P\rho_{l,3})} + \frac{1}{1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2})} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{W_l^i - 1}{2} \left( \frac{P(\rho_{l,2} + \rho_{l,3})}{1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2})} \right)^i}. \quad (3.43)$$

Оскільки  $\rho_{l,1} \gg P\rho_{l,2}$ , то середню тривалість інтервалів  $V_s$  та  $V_c$  можна знайти аналогічно моделі з ідеальним механізмом визначення зайнятості каналу, використовуючи наступні формули:

$$V_s = \frac{1}{M+1} \sum_{f=0}^M \frac{(f + \frac{1}{2}) \sigma (1 - s_{f+1})^N}{1 - \rho_{l,1}}, \quad (3.44)$$

$$V_c = \frac{1}{M+1} \sum_{f=0}^M \sum_{j=0}^f \frac{j \sigma [(1 - s_j)^N - (1 - s_{j+1})^N]}{\rho_{l,1}}. \quad (3.45)$$

У результаті знайдено всі допоміжні величини, необхідні для обчислення пропускних здібностей бездротової локальної та стільникових мереж за формулами (3.30) та (3.39), відповідно.

### 3.2.3 Чисельні результати

Якщо явно не обумовлено зворотне, у цьому розділі використовуються значення параметрів, подані в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Значення параметрів у розділі 3.2

Параметр	Значення
$P$	0,5
$W_{min}$	16
$W_{max}$	1024
$T_l$	8 мс
$T_w$	2,5 мс
$\sigma$	9 мкс
$\theta$	1000 мкс
$d_w$	155 Кбіт
$d_l$	500 Кбіт

Для оцінки точності отриманої аналітичної моделі було проведено порівняння з імітаційною моделлю, в якій не використовувався ряд допущень аналітичної моделі, у тому числі припущення про рівномірний розподіл тривалості вразливого інтервалу на інтервалі  $[0, \theta)$ . Порівняння було проведено у широкому діапазоні сценаріїв та показало, що відносна похибка аналітичної моделі не перевищує 5 % (див. рис. 3.7 як один із прикладів) [88].

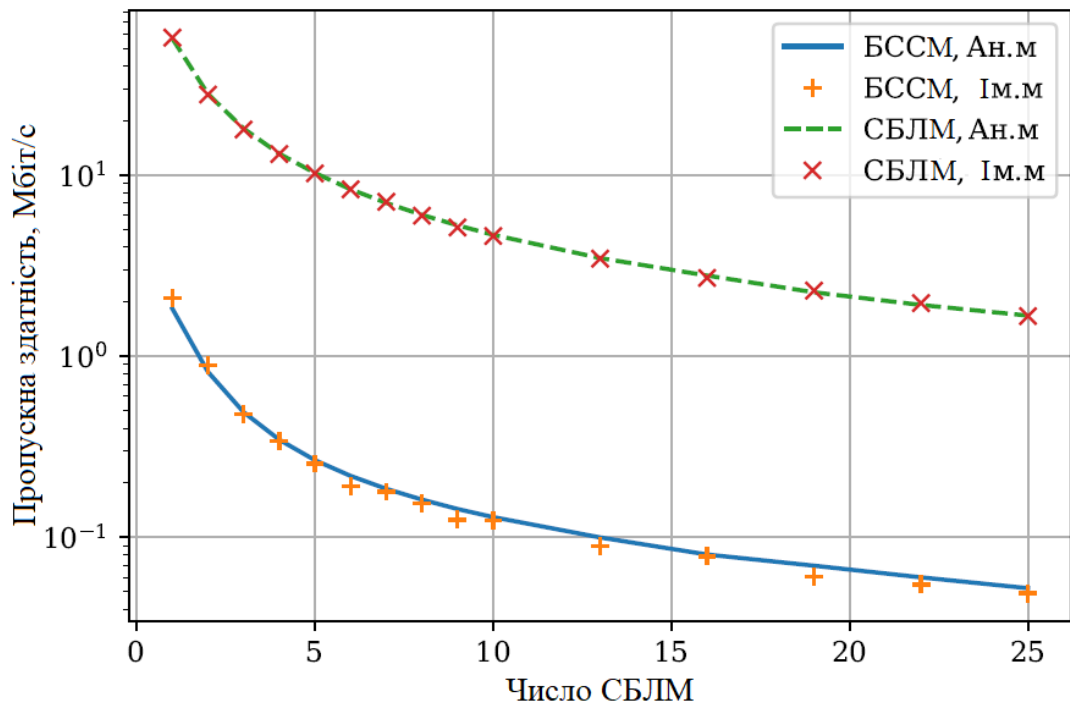


Рисунок 3.7 - Порівняння аналітичної (“Ан.м.”) та імітаційної (“Ім.м.”) моделі при використанні неідеального механізму визначення зайнятості каналу

На рис. 3.8 і 3.9 показаний приріст пропускної спроможності СБЛМ і БССМ при значеннях параметрів конкурентного вікна за замовчуванням ( $W_{w,min} = W_{l,min} = 16$ ) при різній тривалості слоту в ліцензованому каналі. Як можна помітити, якщо БССМ не має пріоритету при доступі до каналу (тобто  $W_{w,min} = W_{l,min}$ ), то її пропускну здатність значно менша за пропускну здатність СБЛМ через високу ймовірність невдачі доступу БССМ, викликані передачами СБЛМ протягом уразливого інтервалу. Слід зазначити, що зі зростанням числа СБЛМ приріст пропускної спроможності БССМ зменшується, оскільки зростає ймовірність невдачі доступу БССМ, і навіть можливість колізії передач БССМ і з СБЛМ. У той самий час приріст пропускної спроможності СБЛМ прагне нуля зі зростанням числа СБЛМ, оскільки вплив БССМ стає менш відчутним.

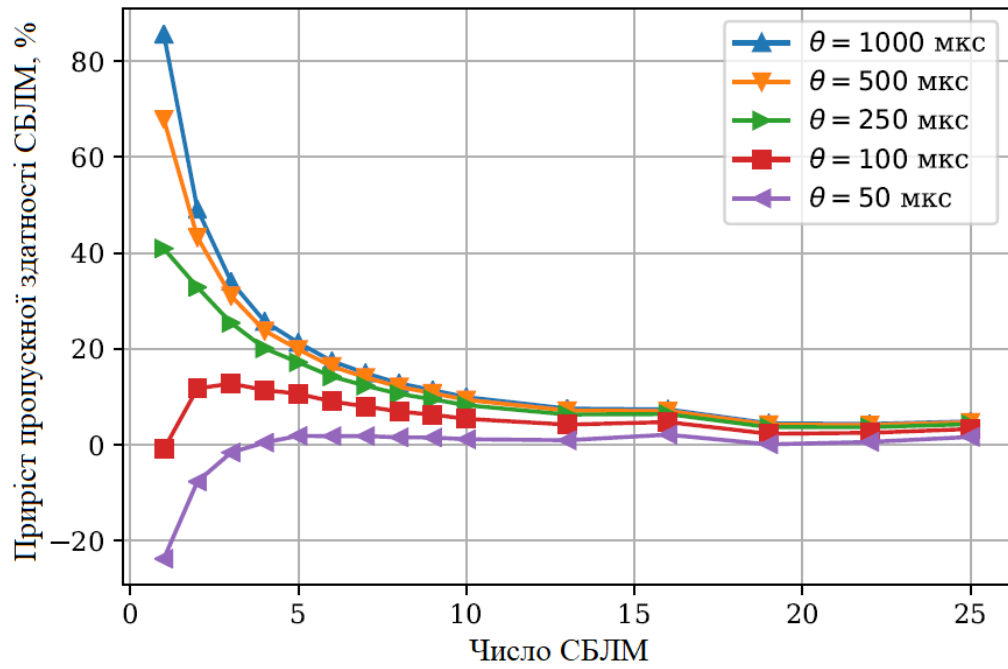


Рисунок 3.8 - Приріст пропускної спроможності СБЛМ при значенні мінімального конкурентного вікна за замовчуванням ( $W_{l,min} = 16$ ) для різної тривалості  $\theta$  слотів у каналі, що ліцензується

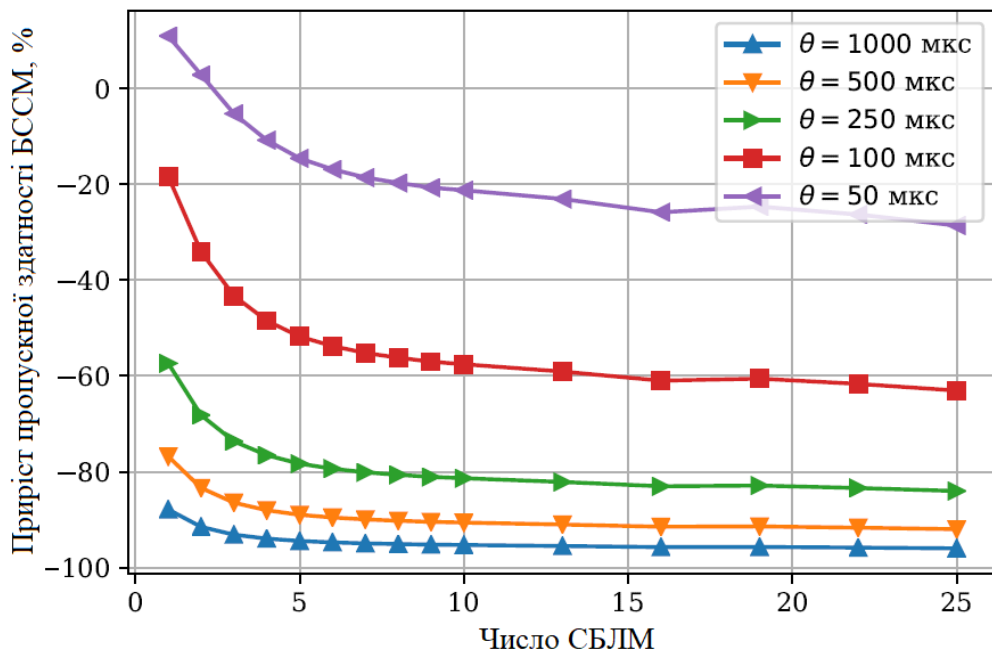


Рисунок 3.9 - Приріст пропускної спроможності БССМ при значенні мінімального конкурентного вікна за замовчуванням ( $W_{l,min} = 16$ ) для різної тривалості  $\theta$  слотів у ліцензованому каналі



При зменшенні тривалості  $\theta$  слоту в каналі, що ліцензується пропускна здатність БССМ зростає, оскільки знижується середня тривалість вразливого інтервалу, що призводить до зниження ймовірності невдачі доступу. Зауважимо, що за значення мінімального конкурентного вікна БССМ за умовчанням ( $W_{l,min} = 16$ ) приріст продуктивності БССМ негативний навіть при  $\theta = 50$  мкс, отже, справедливе з погляду БССМ розподіл ресурсів може бути досягнуто. Крім того, зменшення  $\theta$  призводить до зменшення пропускної спроможності СБЛМ і навіть у деяких випадках до негативного приросту пропускної спроможності СБЛМ (наприклад, при  $\theta = 50$  мкс на рис. 3.8).

Проаналізуємо, як змінюється пропускна здатність обох мереж при зменшенні мінімального конкурентного вікна  $W_{l,min}$ , див. рис. 3.10 та 3.11. Через те, що БССМ отримує пріоритет при доступі до каналу в порівнянні з СБЛМ, приріст пропускної спроможності БССМ зростає і стає позитивним при  $\leq 100$  мкс.

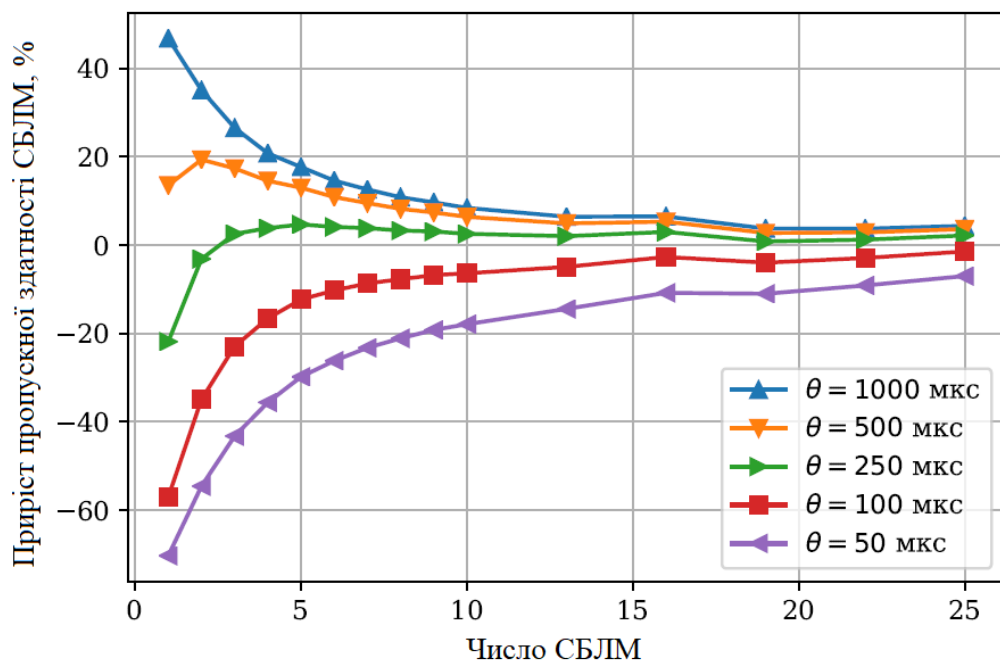


Рисунок 3.10 - Приріст пропускної спроможності СБЛМ при  $W_{l,min} = 4$  для різної тривалості  $\theta$  слотів у ліцензованому каналі

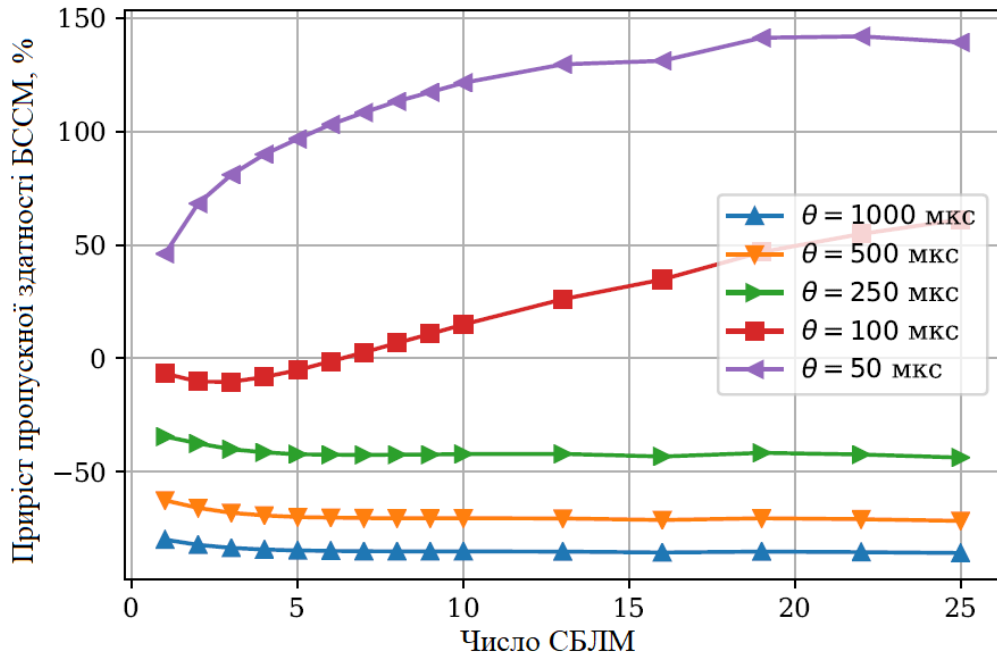


Рисунок 3.11 - Приріст пропускної спроможності БССМ при  $W_{l,min} = 4$  для різної тривалості  $\theta$  слотів у ліцензованому каналі

Знайдемо область значень тривалості  $\theta$  слоту в ліцензованому каналі, в якій розподіл каналних ресурсів є справедливим і ефективним, для різних значень ймовірності  $P$ . На рис. 3.12 та 3.13 наводяться мінімальне  $\theta_{min}$  та максимальне  $\theta_{max}$  значення тривалості  $\theta$  слоту в ліцензованому каналі, для яких приріст пропускної спроможності позитивний для обох мереж. Очевидно, що при  $\theta = \theta_{min}$  приріст пропускної спроможності БССМ досягає максимуму, а приріст пропускної здатності СБЛМ дорівнює нулю, тоді як при  $\theta = \theta_{max}$  - навпаки.

Як можна помітити, зі зростанням  $P$  знижується як  $\theta_{min}$ , так і  $\theta_{max}$ . Це означає, що ймовірність  $P$  має більший вплив на пропускну здатність БССМ, ніж на пропускну здатність СБЛМ. Крім того, довжина інтервалу  $[\theta_{min}, \theta_{max}]$  зменшується зі зростанням  $P$ , оскільки зменшується ефективність механізму доступу до каналу.

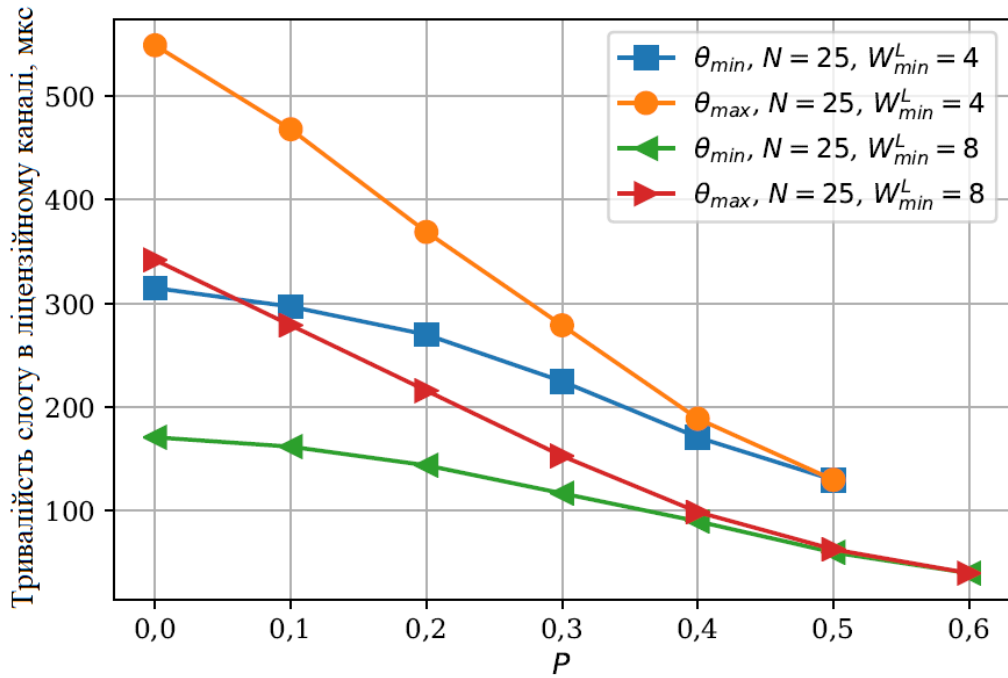


Рисунок 3.12 - Граничні значення тривалості слоту в ліцензованому каналі, при яких забезпечується справедливість розподілу ресурсів при  $N = 25$

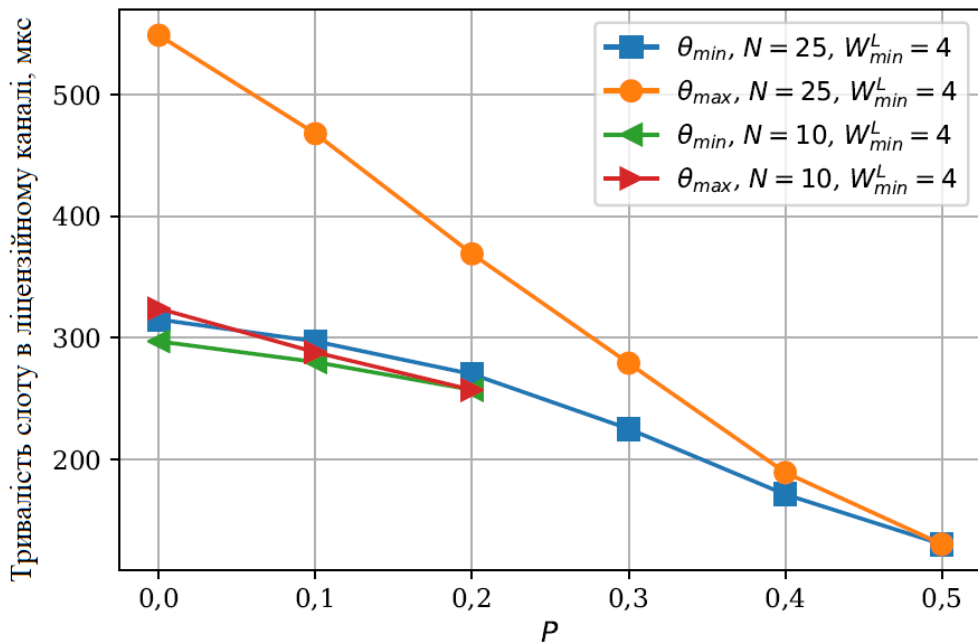


Рисунок 3.13 - Граничні значення тривалості слоту в ліцензованому каналі, при яких забезпечується справедливість розподілу ресурсів при  $W_{l,min} = 4$

На рис. 3.12 представлено порівняння області значень  $\theta$ , що забезпечують негативний приріст пропускної спроможності і СБЛМ, і БССМ, для  $W_{l,min} = 4$  і  $W_{l,min} = 8$ . Як можна помітити, довжина інтервалу  $[\theta_{min}, \theta_{max}]$  знижується зі зростанням  $W_{l,min}$ , однак при  $W_{l,min} = 8$  справедливий та ефективний розподіл ресурсів можливий за більшого діапазону  $P$ .

На рис. 3.13 наведено порівняння  $\theta_{min}$  та  $\theta_{max}$  для  $N = 25$  та  $N = 10$ . Можна помітити, що для меншого числа СБЛМ справедливий та ефективний розподіл каналних ресурсів може бути досягнутий у меншому діапазоні значень  $\theta$ . Тому при меншому справедливий і ефективний розподіл каналних ресурсів можливий при меншому діапазоні.

На рис. 3.14 показаний максимальний приріст пропускної спроможності БССМ при  $\theta = \theta_{min}$  для заданої комбінації значень  $W_{l,min}$ ,  $P$  та  $N$ . Результати показують, що чим більша довжина інтервалу  $[\theta_{min}, \theta_{max}]$ , тим більшої пропускної спроможності БССМ можна досягти при використанні  $\theta = \theta_{min}$ . Крім того, приріст у пропускній здатності зростає при збільшенні числа СБЛМ, а також при збільшенні мінімального конкурентного вікна, БССМ.

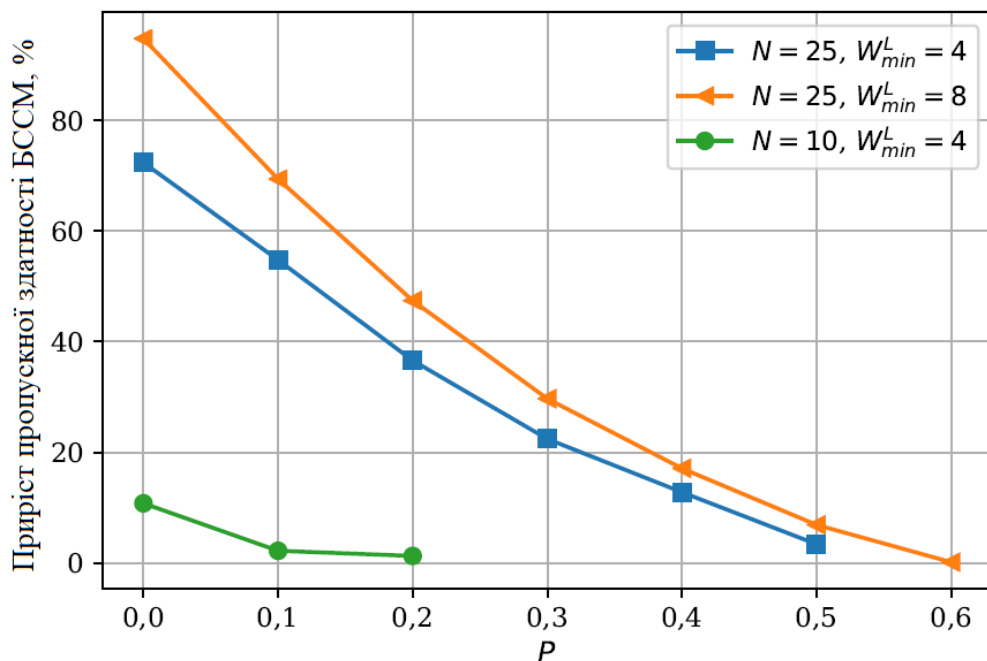


Рисунок 3.14 - Максимальний приріст пропускної спроможності БССМ

### 3.3 Висновки до розділу 3

У третьому розділі розроблено дві аналітичні моделі, що описують роботу без провідної локальної та стільникової мереж у загальному неліцензованому каналі, за умови, що БССМ використовує метод доступу до каналу без резервуючого сигналу.

Перша модель розроблена для випадку, коли і БССМ, і СБЛМ використовують ідеальний (миттєвий) механізм визначення зайнятості каналу. Модель дозволила знайти пропускну спроможність обох мереж, а також оцінити справедливість та ефективність розподілу каналних ресурсів між пристроями різних технологій. За допомогою розробленої моделі було показано, що при використанні методу доступу БССМ без резервуючого сигналу можна домогтися справедливого та ефективного розподілу каналних ресурсів за умови зміни тривалості слотів у каналі, що ліцензується.

Друга модель розроблена для складнішого випадку, коли використовуваний механізм визначення зайнятості каналу неідеальний. Аналогічно моделі з ідеальним механізмом визначення зайнятості каналу, ця модель дозволяє оцінити пропускну спроможність бездротової локальної та стільникової мереж та оцінити справедливість та ефективність розподілу каналних ресурсів. За допомогою розробленої моделі було показано, що справедливого та ефективного розподілу каналних ресурсів можна досягти навіть за використання неідеального механізму детектування зайнятості каналу. Крім того, за допомогою розробленої моделі було оцінено діапазон значень параметрів методу доступу БССМ, в якому можна досягти справедливого та ефективного поділу ресурсів між пристроями різних технологій. Нарешті, було проведено оцінку максимального приросту пропускну спроможності БССМ, у якому розподіл каналних ресурсів буде справедливим і ефективним. На жаль, розроблена аналітична модель показала, що домогтися справедливого та ефективного спільного існування бездротових локальних і стільникових мереж у разі використання БССМ методу доступу

без резервуючого сигналу можна не завжди, навіть якщо є можливість вибирати тривалість слоту в ліцензованому каналі, та інші значення параметрів методу доступу до каналу БССМ.

## 4 МЕТОД ДОЗВОЛУ КОЛІЗІЙ ДЛЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ

Як було показано в розділі 2, використання резервуючого сигналу БССМ призводить до суттєвого зменшення пропускної здатності бездротової локальної мережі. У цьому розділі запропоновано та досліджено метод дозволу колізій для БССМ, заснований на використанні резервуючого сигналу, що дозволяє усунути недоліки базового підходу, розглянутого в розділі 2. Для оцінки ефективності запропонованого методу порівняно з базовим підходом, у цьому розділі була розроблена аналітична модель.

Подальший виклад у цьому розділі побудовано так. У розділі 4.1 наведено докладний опис запропонованого методу дозволу колізії. Після цього, у розділі 4.2 проведено оцінку ймовірності дозволу колізії за умови того, що відоме число БССМ і СБЛМ, що беруть участь у колізії, а також доступний для вирішення колізії часу. У розділі 4.3 описана розроблена аналітична модель роботи системи, що складається з  $N_w$  СБЛМ та  $N_l$  БССМ, що дозволяє оцінити пропускні здатності бездротової локальної та стільникових мереж за умови, що всі БССМ використовують запропонований метод дозволу колізій. У розділі 4.4 за допомогою імітаційного моделювання проведено оцінку точності розробленої моделі, а також представлено результати чисельного моделювання, що показують ефективність запропонованого методу дозволу колізій.

Для зручності прочитання всі основні позначення, що використовуються в цьому розділі, показані в таблиці 4.1

### 4.1 Опис запропонованого методу

Запропонований метод вирішення колізій працює наступним чином. Відразу після завершення процедури відстрочення БССМ поділяє час до

наступного кордону слотів в ліцензованому каналі на тимчасові проміжки тривалістю  $\delta$ , які надалі називатимемо слотами дозволу колізії (ДК-слотами).

Таблиця 4.1 - Список основних позначень, що використовуються у розділі 4

Позначення	Опис
$\theta$	тривалість слотів у ліцензованому каналі
$\delta$	тривалість ДК-слоту
$\xi$	ймовірність того, що БССМ передасть резервуючий сигнал протягом інтервалу $T_s$ ДК-слоту
$K_{max}$	максимальна кількість ДК-слотів
$\eta$	ймовірність того, що приймач Wi-Fi успішно декодує преамбулу у разі колізії завдяки ефекту захоплення
$C(N,K)$	ймовірність дозволу колізії $N$ БССМ за наявності $K$ доступних ДК-слотів
$\tau_w (\tau_l)$	ймовірність того, що обрана СБЛМ (БССМ) вибере поточний віртуальний слот для передачі
$W_{min} (W_{max})$	мінімальне (максимальне) значення конкурентного вікна
$\rho_w (\rho_l)$	ймовірність неуспішної спроби передачі СБЛМ (БССМ) за умови, що вона вибрала поточний слот для передачі
$N_w (N_l)$	число СБЛМ (БССМ) у системі, що розглядається
$\sigma$	тривалість порожнього слота
$T_{slot}$	середня тривалість віртуального слота
$S_w (S_l)$	пропускна спроможність бездротової локальної (стільникової) мережі



У кожному ДК-слоті БССМ або тільки передає резервуючий сигнал, або ще й намагається задетектувати передачу інших СБЛМ/БССМ. Якщо БССМ вдається задетектувати чиюсь передачу протягом ДК-слоту, БССМ відкладає поточну спробу передачі, подвоює поточне значення конкурентного вікна і повторює процедуру відстрочки.

Опишемо роботу розробленого методу дозволу колізій докладніше. Як тільки БССМ закінчила процедуру відстрочення, БССМ визначає доступне число  $K$  ДК слотів наступним чином:

$$K = \min\left(\left\lfloor \frac{t}{\delta} \right\rfloor, K_{max}\right), \quad (4.1)$$

де  $t$  - це довжина проміжку часу між закінченням процедури відстрочення і наступною межею слотів в ліцензованому каналі,  $\delta$  - це тривалість ДК-слота,  $K_{max}$  - це максимальна кількість ДК-слотів.

Якщо  $K = 0$ , то БССМ передає резервуючий сигнал аж до найближчої межі слотів у ліцензованому каналі, після чого йде передача даних, тобто поведінка БССМ, що ідентично розглядається в розділі 2.

Якщо  $K > 0$ , то на початку ДК-слоту БССМ передає короткий резервуючий сигнал протягом  $T_r$ . Тривалість  $T_r$  повинна бути обрана таким чином, щоб протягом  $T_r$  всі БССМ/СБЛМ, які вирішили не передавати в поточному слоті відстрочки, могли задетектувати, що канал став зайнятий; у разі колізії передач БССМ та СБЛМ вплив резервуючого сигналу на передачу СБЛМ був мінімально можливим.

У зв'язку з цим у цій дипломній роботі пропонується вибрати  $T_r = 8$  мкс, що дорівнює тривалості преамбули L-STF в заголовку кадру Wi-Fi, яка може бути успішно декодована навіть при великому рівні шуму [89, 90].

Після передачі резервуючого сигналу протягом  $T_r$ , БССМ протягом  $T_s = \delta - T_r$  або продовжує посилати резервуючий сигнал, або прослуховує канал. Тривалість  $T_s$  повинна бути обрана таким чином, щоб протягом  $T_s$  БССМ могла визначити зайнятість каналу та жодна з БССМ/СБЛМ, яка бере участь у

колізії, не могла відновити процедуру відстрочки, тобто  $T_s$  має бути меншим ніж інтервал  $PIFS = 25$  мкс, визначений у стандарті Wi-Fi [14].

Якщо протягом ДК-слоту БССМ прослуховує канал і виявляє, що він зайнятий, то БССМ детектує колізію, відкладає поточну передачу, подвоєє поточне значення конкурентного вікна і повторює процедуру відстрочення. В іншому випадку, якщо БССМ виявляє порожній канал, або вона вирішила передавати резервуючий сигнал протягом  $T_s$ , БССМ зменшує число доступних ДК-слотів на одиницю і переходить до наступного ДК-слоту, якщо такі залишилися.

Щоб задетектувати колізію з передачами СБЛМ, у першому ДК-слоті всі БССМ прослуховують канал. У наступних ДК-слотах БССМ передає резервуючий сигнал протягом  $T_s$  з ймовірністю  $\xi$  і прослуховує канал з ймовірністю  $1-\xi$ . Якщо після закінчення всіх ДК-слотів БССМ не вирішила відкласти передачу даних, вона передає резервуючий сигнал аж до наступного кордону слотів в ліцензованому каналі після чого відбувається передача даних.

#### 4.2 Оцінка ймовірності дозволу колізії

Оцінимо, у яких випадках запропонований метод дозволяє детектувати та дозволити колізії за участю БССМ та СБЛМ.

Нехай  $n$  БССМ та  $m$  СБЛМ одночасно закінчили процедуру відстрочення та розпочали передачу, а тривалість інтервалу між закінченням процедури відстрочення і найближчим кордоном слотів в ліцензованому каналі дорівнює  $t$ .

Якщо  $m > 0$ , всі БССМ задетектують початок передачі СБЛМ і відкладуть свої передачі, якщо  $t \geq \delta$ . Якщо  $m = 0$  і  $t \geq 2\delta$ , запропонований метод дозволяє дозволити колізію, якщо в результаті його роботи рівно одна БССМ, що беруть участь у колізії, вирішить не відкладати свою передачу після всіх доступних ДК-слотів.

Наступна теорема дозволяє оцінити ймовірність вирішення колізії в залежності від різних факторів.

Теорема 1. Нехай БССМ одночасно закінчили процедуру відстрочення, і для вирішення колізії доступно ДК-слотів. Тоді ймовірність  $C(n, k)$  дозволу колізії за допомогою запропонованого методу дозволу колізій можна знайти наступним чином:

$$C(n, k) = \begin{cases} 1, & \text{если } n = 1, \\ 0, & \text{если } n > 1, k < 2, \\ n\xi(1 - \xi)^{n-1}, & \text{если } n > 1, k = 2, \\ (1 - \xi)^n C(n, k - 1) + \sum_{i=1}^n \binom{n}{i} \xi^i (1 - \xi)^{n-i} C(i, k - 1), & \text{если } n > 1, k > 2. \end{cases}$$

Доведення. Очевидно, що якщо тільки одна БССМ закінчила процедуру відстрочення, то колізія не відбулася, а отже,  $C(1, k) = 1$ .

Якщо для вирішення колізії доступно менше двох ДК-слотів, то запропонований метод не дозволяє дозволити колізію двох і більше БССМ, див. розділ 4.1.

Якщо для дозволу колізій доступно рівно два ДК-слоти, то колізія буде дозволена, якщо рівно одна з БССМ вирішить передати резервуючий сигнал протягом інтервалу другого ДК-слота, в той час як БССМ, що залишилися, вирішать прослухати канал, що відбувається з ймовірністю

$$C(n > 1, k = 2) = n\xi(1 - \xi)^{n-1}. \quad (4.2)$$

В інших випадках ймовірність дозволу колізії  $C(n, k)$  за наявності ДК слотів може бути знайдена рекурсивно за допомогою ймовірності дозволу колізії за наявності  $k - 1$  ДК-слотів. Нехай для дозволу колізії доступно  $k$  ДК-слотів та  $n$  БССМ беруть участь у колізії. Тоді з ймовірністю  $(1 - \xi)^n$  усі БССМ будуть прослуховувати канал протягом інтервалу  $T_s$  поточного ДК-слоту, а значить число  $n$  залишиться незмінним. Якщо  $i$  БССМ будуть передавати резервуючий сигнал протягом усього ДК слота, а решта  $n - i$  БССМ прослуховуватимуть канал (це відбувається з ймовірністю  $\binom{n}{i} \xi^i (1 - \xi)^{n-i}$ ), то

число  $n$  БССМ, що беруть участь у колізії, зміниться і стане рівним  $i$ . В результаті ймовірність дозволу колізії  $C(n, k)$  у випадку  $n > 1$  и  $k > 2$  може бути знайдена таким чином:

$$C(n > 1, k > 2) = (1 - \xi)^n C(n, k - 1) + \sum_{i=1}^n \binom{n}{i} \xi^i (1 - \xi)^{n-i} C(i, k - 1). \quad (4.3)$$

### 4.3 Аналітична модель

#### 4.3.1 Припущення моделі

У цьому розділі при побудові моделі були використані припущення, аналогічні зробленим у розділі 2 (див. Розділ 2.1.1).

Єдиною відмінністю є те, що в розділі 2 вважалось, що за колізії за участю передач СБЛМ, одержувачу ніколи не вдається успішно декодувати дані. На відміну від аналітичної моделі, описаної в розділі 2, в даному розділі буде враховано той факт, що параметри методу дозволу колізій підібрані таким чином, щоб у разі колізії з передачами СБЛМ проводити мінімально можливий вплив на прийом кадру СБЛМ. Зокрема, у цьому розділі будемо припускати, що за використання розробленого методу дозволу колізій одержувач бездротової локальної мережі може прийняти пакет у разі колізії, якщо виконані такі умови:

- відбулася колізія за участю передач рівно однієї СБЛМ і хоча б однієї з БССМ;
- всі БССМ змогли задетектувати, що СБЛМ почала передачу (що відбувається, якщо  $t > \delta$ );
- одержувач бездротової локальної мережі зміг декодувати преамбулу (а разом з нею та решту кадру) завдяки ефекту захоплення (це відбувається з імовірністю  $\eta$ ).

### 4.3.2 Опис моделі

Так як лічильники відстрочки всіх СБЛМ і БССМ у аналізованій системі працюють синхронно, будемо використовувати підхід, заснований на понятті віртуального слота і аналогічний використаному в розділі 2. У зв'язку з цим скористаємося тими ж визначеннями ймовірностей  $\tau_l$  ( $\tau_w$ ), які були дані в розділ 2, причому значення цих ймовірностей можуть бути знайдені за формулою (2.1).

Вибрана СБЛМ успішно передає дані у поточному віртуальному слоті при виконанні наступних умов:

1) жодна з інших СБЛМ не вибрала поточний слот для передачі (це відбувається з ймовірністю  $(1 - \tau_w)^{N_w - 1}$ );

2) або жодна з БССМ не вибрала поточний слот для передачі (це відбувається з вірогідністю  $(1 - \tau_l)^{N_l}$ ), або частина БССМ обрала його (це відбувається з ймовірністю  $1 - (1 - \tau_l)^{N_l}$ ), але

– усі котрі потрапили до колізії БССМ задетектировали колізію (це відбувається з ймовірністю  $1 - \delta/\theta$ ), тобто тривалість інтервалу між закінченням процедури відстрочки і найближчим кордоном слотів в ліцензованому каналі була більша  $\delta$ ;

– одержувачу передачі Wi-Fi вдалося декодувати преамбулу завдяки ефекту захоплення (це відбувається з ймовірністю  $\eta$ ).

В результаті, ймовірність  $\rho_w$  невдалої спроби передачі СБЛМ можна знайти таким чином:

$$\rho_w = 1 - (1 - \tau_w)^{N_w - 1} \left[ (1 - \tau_l)^{N_l} + \eta \left(1 - \frac{\delta}{\theta}\right) (1 - (1 - \tau_l)^{N_l}) \right]. \quad (4.4)$$

Вибрана БССМ успішно передає дані у поточному віртуальному слоті, якщо жодна СБЛМ не вибрала його передачі (це відбувається з ймовірністю  $(1 - \tau_w)^{N_w}$ ), тоді як інші БССМ або вибрали його передачі (це відбувається з ймовірністю  $(1 - \tau_l)^{N_l - 1}$ ), або колізія, що відбулася, була дозволена на користь

обраної БССМ. В результаті, ймовірність  $\rho_l$  неуспішної спроби передачі БССМ за умови, що вона обрала поточний слот для передачі, дорівнює:

$$\rho_l = 1 - (1 - \tau_w)^{N_w} \left( (1 - \tau_l)^{N_l - 1} + \sum_{i=1}^{N_l - 1} \binom{N_l - 1}{i} \tau_l^i (1 - \tau_l)^{N_l - 1 - i} \frac{\gamma(i + 1)}{i + 1} \right), \quad (4.5)$$

де  $\gamma(i)$  – це ймовірність того, що у разі колізії рівно  $i$  БССМ ця колізія буде дозволена.

Для того щоб знайти ймовірність  $\gamma(i)$ , необхідно усереднити ймовірність  $C(N, K)$  дозволу колізії, знайдену в розділі 4.2, за часом  $t$  між закінченням процедури відстрочки і слотів в ліцензованому каналі ( $i$ , як наслідок, за доступним числом - слотів). Зважаючи на той факт, що запропонований метод не дозволяє дозволити колізію БССМ при  $< 2\delta$ , ймовірність  $\gamma(i)$  можна знайти таким чином:

$$\gamma(i) = \sum_{k=2}^{\lfloor \theta/\delta \rfloor - 1} \frac{\delta}{\theta} C(i, \min(k, K_{max})) + \left( 1 - \lfloor \frac{\theta}{\delta} \rfloor \frac{\delta}{\theta} \right) C(i, \min(\lfloor \theta/\delta \rfloor, K_{max})). \quad (4.6)$$

Розв'язавши систему рівнянь (2.1), (4.4) та (4.5), знайдемо шукані ймовірності  $\tau$  і  $\rho$ . Після цього пропускну здатність  $S_w$  бездротової локальної мережі можна знайти таким чином:

$$S_w = \frac{\pi_{w,s} d_w}{T_{slot}}, \quad (4.7)$$

де  $T_{slot}$  - це середня тривалість віртуального слота,  $\pi_{w,s}$  - це ймовірність того, що якась СБЛМ успішно передасть дані у вибраному віртуальному слоті.

Віртуальний слот зайнятий успішною передачею однієї із СБЛМ, якщо виконані такі умови:

1) рівно одна із СБЛМ вибрала даний слот для передачі (це відбувається з ймовірністю  $N_w \tau_w (1 - \tau_w)^{N_w - 1}$ );

2) або жодна з БССМ не обрала поточний слот для передачі (це відбувається з ймовірністю  $(1 - \tau_l)^{N_l}$ ), або частина БССМ обрала його (це відбувається з ймовірністю  $1 - (1 - \tau_l)^{N_l}$ ), але

- усі котрі потрапили до колізії БССМ задетектировали колізію (це відбувається з ймовірністю  $1 - \delta/\theta$ ), тобто тривалість інтервалу між закінченням і найближчим кордоном слотів в каналі, що ліцензується, була більша  $\delta$ ;
- одержувачу передачі Wi-Fi вдалося декодувати преамбулу завдяки ефекту захоплення (це відбувається з ймовірністю  $\eta$ ).

В результаті, ймовірність  $\pi$  може бути виражена наступним чином:

$$\pi_{w,s} = N_w \tau_w (1 - \tau_w)^{N_w - 1} \left[ (1 - \pi_l)^{N_l} + \eta \left(1 - \frac{\delta}{\theta}\right) (1 - (1 - \pi_l)^{N_l}) \right]. \quad (4.8)$$

Знайдемо пропускну здатність  $S_l$  стільникової мережі. Якась БССМ успішно передає дані (або хоча б їх частину) у поточному віртуальному слоті, якщо відбувається одна з наступних подій:

- жодна з інших БССМ і жодна СБЛМ не вибрали цей слот для передачі (це відбувається з ймовірністю 1 знайденої в розділі 2 в (2.8));
- жодна з СБЛМ не вибрала цей слот для передачі, але відбулася колізія передач БССМ, яка була дозволена за допомогою розробленого методу дозволу колізій (це відбувається з ймовірністю  $p_{l,3}$ );
- жодна з інших БССМ не вибрала цей слот, а хоча б одна СБЛМ вибрала цей слот для передачі (це відбувається з ймовірністю  $p_{l,2}$  знайденої в розділі 2 (2.9)), але обрана БССМ не змогла задетектувати колізію (це відбувається з ймовірністю  $\delta/\theta$ ).

Вважаємо, яка частина передачі БССМ у кожному з описаних вище випадків буде успішно декодована одержувачем. У двох випадках, тобто з ймовірністю  $p_{l,1} + p_{l,3}$ , БССМ передасть резервуючий сигнал у середньому протягом  $\theta/2$  секунд, а частина передачі, що залишилася, рівна  $(1 - \theta/(2T_l))$ , міститиме дані, які будуть успішно декодовані одержувачем. У третьому випадку лише частина передачі БССМ, що дорівнює  $(1 - T_{w,c}/T_l)$ , не буде порушена колізією з передачею СБЛМ і успішно декодована одержувачем. В

результаті пропускну здатність  $S_l$  стільникової мережі можна знайти таким чином:

$$S_l = \left( (p_{l,1} + p_{l,3}) \left(1 - \frac{\theta}{2T_l}\right) + p_{l,2} \frac{\delta}{\theta} \left(1 - \frac{T_{w,c}}{T_l}\right) \right) \frac{d_l}{T_{slot}}, \quad (4.9)$$

де  $p_{l,3}$  визначається наступним виразом:

$$p_{l,3} = (1 - \tau_w)^{N_w} \left( \sum_{i=2}^{N_l} \binom{N_l}{i} \tau_l^i (1 - \tau_l)^{N_l-i} \gamma(i) \right). \quad (4.10)$$

Знайдемо середню тривалість  $T_{slot}$  віртуального слота. Ймовірність  $\pi_e$  того, що вибраний віртуальний слот виявиться порожнім, так само, як і в розділі 2, знаходиться за допомогою рівняння (2.10).

Знайдемо ймовірність  $\pi_l$  того, що в даному віртуальному слоті хоча б одна з БССМ спробує почати передачу даних. Це станеться, якщо хоча б одна БССМ вибрала поточний слот для передачі (це відбувається з ймовірністю  $1 - (1 - \tau_l)^{N_l}$ ) і відбувається одна з наступних подій:

- жодна із СБЛМ не вибрала поточний слот для передачі (це відбувається з ймовірністю  $(1 - \tau_w)^{N_w}$ );
- хоча б одна із СБЛМ вибрала поточний слот для передачі (це відбувається з ймовірністю  $1 - (1 - \tau_w)^{N_w}$ ), але БССМ не змогла задетектувати передачу СБЛМ (це відбувається з ймовірністю  $\delta/\theta$ ), оскільки кількість доступних ДК- слотів дорівнювало нулю.

У результаті ймовірність  $\pi$  можна знайти таким чином:

$$\pi_l = (1 - (1 - \tau_l)^{N_l}) \left( (1 - \tau_w)^{N_w} + \frac{\delta}{\theta} (1 - (1 - \tau_w)^{N_w}) \right). \quad (4.11)$$

Використовуючи знайдені ймовірності, середню тривалість  $T_{slot}$  віртуального слота можна виразити наступним чином:

$$T_{slot} = \pi_e \sigma + \pi_{w,s} T_{w,s} + \pi_l T_l + (1 - \pi_e - \pi_{w,s} - \pi_l) T_{w,c}. \quad (4.12)$$

У результаті знайдено всі допоміжні величини, необхідні для обчислення пропускну здібностей бездротової локальної та стільникових мереж, за формулами (4.7) та (4.9), відповідно.



#### 4.4 Чисельні результати

У цьому розділі за допомогою розробленої аналітичної моделі буде проаналізовано ефективність запропонованого методу дозволу колізій (МДК) для базових станцій стільникових мереж. Зокрема, у розділі 4.4.1 буде проведено аналіз ймовірності розв'язання колізії в залежності від кількості БССМ, що потрапили до колізії, а також до ступеня ДК-слотів. Після цього у розділі 4.4.2 буде проведено оцінку впливу МДК на пропускну здатність бездротових локальних та стільникових мереж.

Якщо явно не обумовлено зворотне, у даному розділі використовуються значення параметрів, подані в таблиці 4.2.

##### 4.4.1 Аналіз ймовірності дозволу колізії при використанні МДК

Проаналізуємо ефективність запропонованого методу вирішення колізій. Зокрема, знайдемо таке значення  $\xi_{opt}$ , яке максимізує ймовірність  $C(N, K)$  дозволу колізій для заданого числа  $N$  БССМ, що беруть участь у колізії, та заданого числа  $K$  доступних ДК-слотів.

Нескладно показати, що рішення у явному вигляді можна знайти тільки для наступних простих випадків.

1) Нехай  $N$  БССМ потрапили до колізії та  $K = 2$  ДК-слотів доступно для дозволу колізії. Як було показано в розділі 4.2, ймовірність вирішення колізії в цьому випадку дорівнює наступному виразу:

$$C(N, K) = N\xi(1 - \xi)^{N-1}. \quad (4.13)$$

Таблиця 4.2 - Значення параметрів, що використовуються

Параметр	Значення
$\eta$	0,5
$\xi$	0,5
$W_{min}$	16
$W_{max}$	1024
$T_l$	8 мс
$T_{w,s}$	2,5 мс
$T_{w,c}$	44 мкс при використанні механізму RTS/CTS; Інакше 2,5 мс
$\sigma$	9 мкс
$\delta$	30 мкс
$\theta$	500 мкс
$d_w$	187.5 Кбіт
$d_l$	600 Кбіт

Для того щоб знайти максимальне значення ймовірності дозволу колізії, візьмемо похідну цього виразу за змінною  $\xi$ :

$$\frac{dC(N, K)}{d\xi} = N(1 - \xi)^{N-1} - N(N - 1)\xi(1 - \xi)^{N-2} = N(1 - \xi)^{N-2}(1 - N\xi). \quad (4.14)$$

Звідси отримуємо, що  $\xi_{opt} = 1/N$ , а максимальне значення ймовірності розв'язання колізії своєю чергою дорівнює  $C(N, 2) = (1 - 1/N)^{N-1}$ .

2) Нехай  $N = 2$  БССМ потрапили в колізію та  $K$  ДК-слотів доступно для її вирішення. Колізія не буде дозволена, тільки якщо у всіх ДК-слотах обидві БССМ одночасно вирішили або передавати резервуючий сигнал протягом усього ДК-слота, або прослуховувати канал протягом інтервалу  $T_s$ . В

результаті, ймовірність дозволу колізії в даному випадку може бути знайдена таким чином:

$$C(N, K) = 1 - (\xi^2 + (1 - \xi)^2)^K. \quad (4.15)$$

Аналогічно попередньому випадку, візьмемо похідну цього виразу мінної  $\xi$ :

$$\frac{dC(N, K)}{d\xi} = -K(\xi^2 + (1 - \xi)^2)^{K-1}(2\xi - 2(1 - \xi)). \quad (4.16)$$

Звідси отримуємо, що  $\xi_{opt} = 0,5$  і максимальне значення ймовірності дозволу колізії, у свою чергу, дорівнює  $C(2, K) = 1 - (1/2)^{K-1}$ .

3) Нехай  $N = 3$  БССМ потрапили в колізію і  $K = 3$  ДК-слотів доступно для її дозволу.

Розпишемо ймовірність дозволу колізії у явному вигляді для даного випадку, застосувавши вирази (4.2)–(4.3), знайдені у розділі 4.2:

$$\begin{aligned} C(3, 3) &= (1 - \xi)^3 C(3, 2) + \sum_{i=1}^3 \binom{3}{i} \xi^i (1 - \xi)^{3-i} C(i, 2) = \\ &= (1 - \xi)^3 \cdot 3\xi(1 - \xi)^2 + 3\xi(1 - \xi)^2 \cdot 1 + 3\xi^2(1 - \xi) \cdot 2\xi(1 - \xi) + \xi^3 \cdot 3\xi(1 - \xi)^2 = \\ &= 3\xi(1 - \xi)^2(5\xi^2 - 3\xi + 2) = 15\xi^5 - 39\xi^4 + 39\xi^3 - 21\xi^2 + 6\xi. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Аналогічно попередньому випадку, візьмемо похідну цього виразу за змінною  $\xi$ :

$$\frac{dC(3, 3)}{d\xi} = 75\xi^4 - 156\xi^3 + 117\xi^2 - 42\xi + 6 = 3(\xi - 1)(25\xi^3 - 27\xi^2 + 12\xi - 2). \quad (4.18)$$

Щоб знайти максимум ймовірності дозволу колізії, потрібно знайти дійсне рішення наступного рівняння:

$$25\xi^3 - 27\xi^2 + 12\xi - 2 = 0, \quad (4.19)$$

що належить інтервалу  $\xi \in (0; 1)$  Для цього скористаємося добре відомою формулою Кардано для розв'язання кубічних рівнянь [91].

Для початку, наведемо рівняння (4.19) до канонічного виду за допомогою заміни змінних  $\xi = x - 9/25$ , яке після цього набуде наступного вигляду:

$$x^3 + px + q = 0, \quad (4.20)$$

де  $p = (19 \cdot 3) / (5^4)$  і  $q = -(2^3) / (5^6)$ .

У даного рівняння два пов'язані комплексні корені і один дійсний корінь [91], так як

$$Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2 = \frac{11}{5^8} > 0. \quad (4.21)$$

згідно з формулою Кардано, дійсний корінь у такому випадку знаходиться наступним чином:

$$x = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} = \frac{\sqrt[3]{4 + 25\sqrt{11}} + \sqrt[3]{4 - 25\sqrt{11}}}{25}. \quad (4.22)$$

Зробивши зворотну заміну, отримуємо, що

$$\xi_{opt} = \frac{9 + \sqrt[3]{4 + 25\sqrt{11}} + \sqrt[3]{4 - 25\sqrt{11}}}{25} \approx 0,3656. \quad (4.23)$$

Максимальне значення ймовірності дозволу колізії в даному випадку дорівнюватиме  $C(3, 3) \approx 0,6937$ .

В інших випадках знайдемо  $\xi_{opt}$  за допомогою перебору значень  $\xi$  з кроком  $\Delta\xi$  при заданому числі  $N$  БССМ, що беруть участь у колізії, та при заданому числі  $K$  доступних ДК-слотів (див. приклад для  $K = 4$  і  $\Delta\xi = 5 \cdot 10^{-4}$  на рис. 4.1).

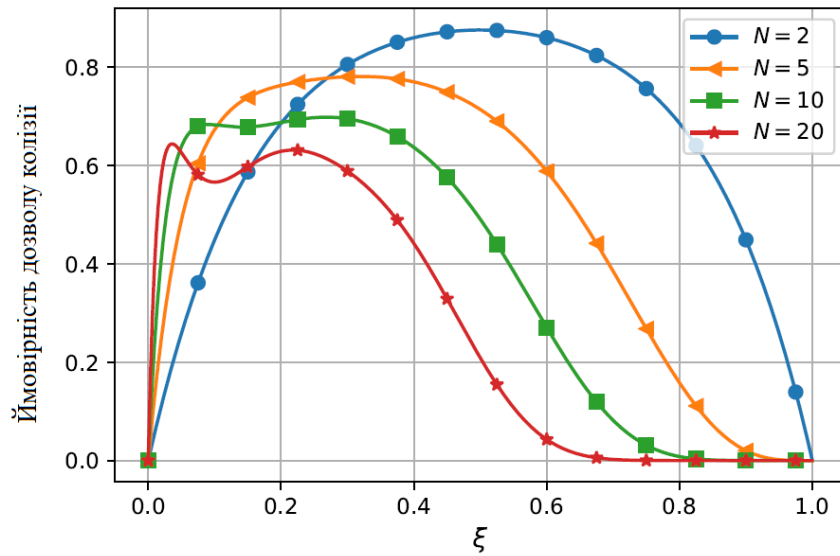


Рисунок 4.1 - Залежність ймовірності  $C(N, K)$  дозволу колізії від  $\xi$  та  $N$  при  $K = 4$

Оптимальні значення  $\xi_{opt}$  для різних значень  $N$  та  $K$  показані на рис. 4.2. Як і можна було очікувати,  $\xi_{opt}$  завжди не більше 0,5. Крім цього, слід зазначити, що при великих значеннях  $K$  значення  $\xi_{opt}$  прагне значення 0,5 для всіх розглянутих значень  $N$ .

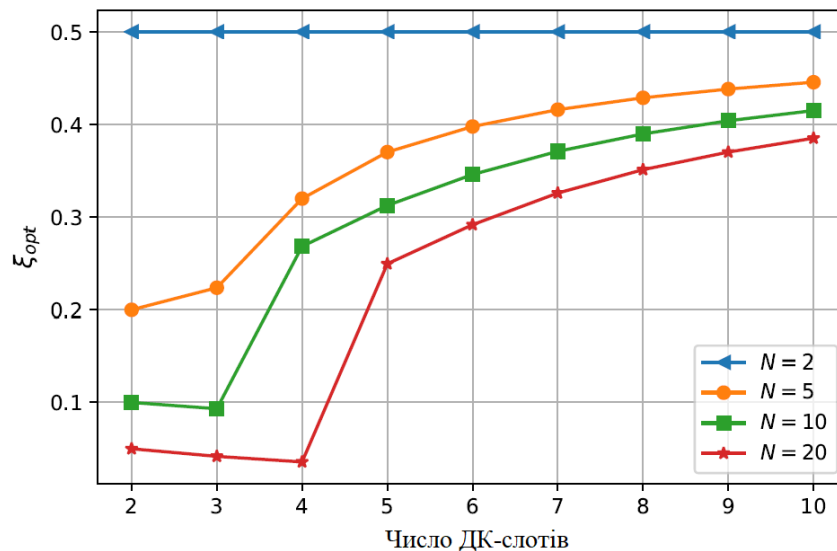


Рисунок 4.2 - Оптимальне значення  $\xi$ , максимізує ймовірність  $C(N, K)$  дозволу колізії для різного числа  $K$  доступних ДК-слотів і  $N$  БССМ, що беруть участь у колізії

Так як зазвичай точне число  $N$  БССМ, що потрапили в колізію, невідомо, виникає необхідність вибору квазіоптимального універсального значення  $\xi$ , що не залежить від  $N$ . Виберемо в якості такого квазіоптимального значення 0,5 (нагадаємо, що це оптимальне значення при  $N = 2$ ) і порівняємо ймовірність дозволу колізії при  $\xi = \xi_{opt}$  та  $\xi = 0,5$ , див. рис. 4.3. Якщо число доступних ДК-слотів мало, використання значення  $\xi = 0,5$  замість оптимального значення  $\xi = \xi_{opt}$  значно зменшує ймовірність  $C(N, K)$  дозволу колізії, особливо якщо число  $N$  БССМ велике. Однак із зростанням  $K$  ймовірність  $C(N, K)$  досить швидко прагне до 1 навіть для великих  $N$  при використанні неоптимального  $\xi = 0,5$ .

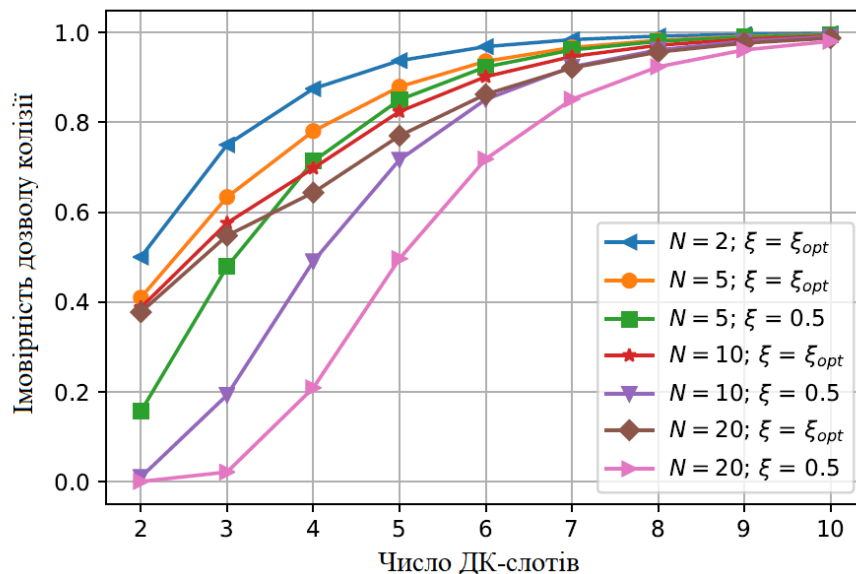


Рисунок 4.3 - Ймовірність дозволу колізії при  $\xi = \xi_{opt}$  та  $\xi = 0,5$  в залежності від числа  $K$  доступних ДК-слотів та  $N$  БССМ, що беруть участь у колізії

Крім того, слід зазначити, що ймовірність колізії рівно  $N$  БССМ різко падає зі зростанням  $N$  завдяки використанню процедури двійкової експоненційної відстрочки у методах випадкового доступу до загального каналу в бездротових локальних та стільникових мережах. Виходячи з цього, можна припустити, що оптимальне значення  $\xi$  з погляду пропускну здатність стільникових мереж буде близько до такого при  $N = 2$ . Тому, у всіх чисельних

експериментах, показаних у наступному розділі, було використано значення  $\xi = 0,5$ .

#### 4.4.2 Аналіз впливу МДК на пропускну спроможність бездротових локальних та стільникових мереж

Аналогічно розділу 2.2 була проведена оцінка точності розробленої аналітичної моделі за допомогою імітаційного моделювання для випадку, коли всі БССМ використовують МДК. Згідно з отриманими результатами, різниця між результатами роботи аналітичної та імітаційної моделей не перевищує 6% у всіх розглянутих сценаріях, див. рис. 4.4 як приклад.

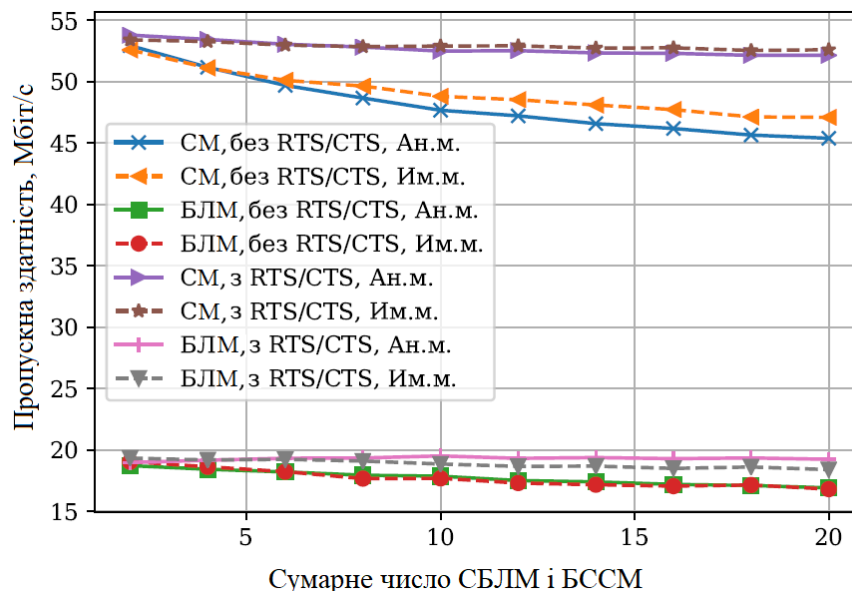


Рисунок 4.4 - Пропускна здатність бездротової локальної (БЛМ) та стільникової (СМ) мереж при рівній кількості СБЛМ та БССМ, отримана за допомогою аналітичної (Ан.м.) та імітаційної (Ім.м.) моделей, при використанні МДК

Почнемо аналіз ефективності розробленого МДК зі сценарію 1, у якому число СБЛМ і БССМ однакове, див. рис. 4.5. Як було показано у розділі 2, у такому сценарії пропускна здатність бездротової локальної мережі виявляється значно менше пропускну здатності стільникової мережі. На рис.

4.6 показаний приріст пропускної здатності, отриманий при використанні МДК у порівнянні з базовим підходом (БП) у сценарії 1. Як можна помітити, запропонований метод дозволу колізій дозволяє значно підвищити пропускну здатність бездротової локальної мережі (до 3 разів, коли СБЛМ використовує механізм RTS/CTS, і до 1, 7 разів без використання механізму RTS/CTS) без погіршення пропускної здатності стільникової мережі.

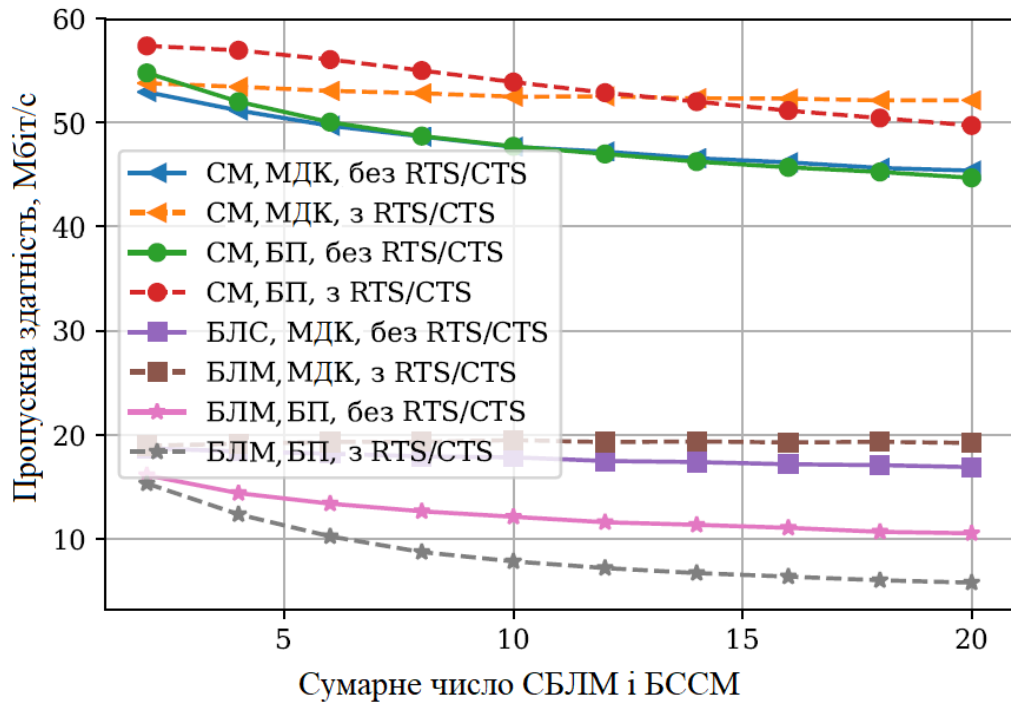


Рисунок 4.5 - Пропускна здатність бездротової локальної (БЛМ) та стільникової (СМ) мережі у сценарії 1



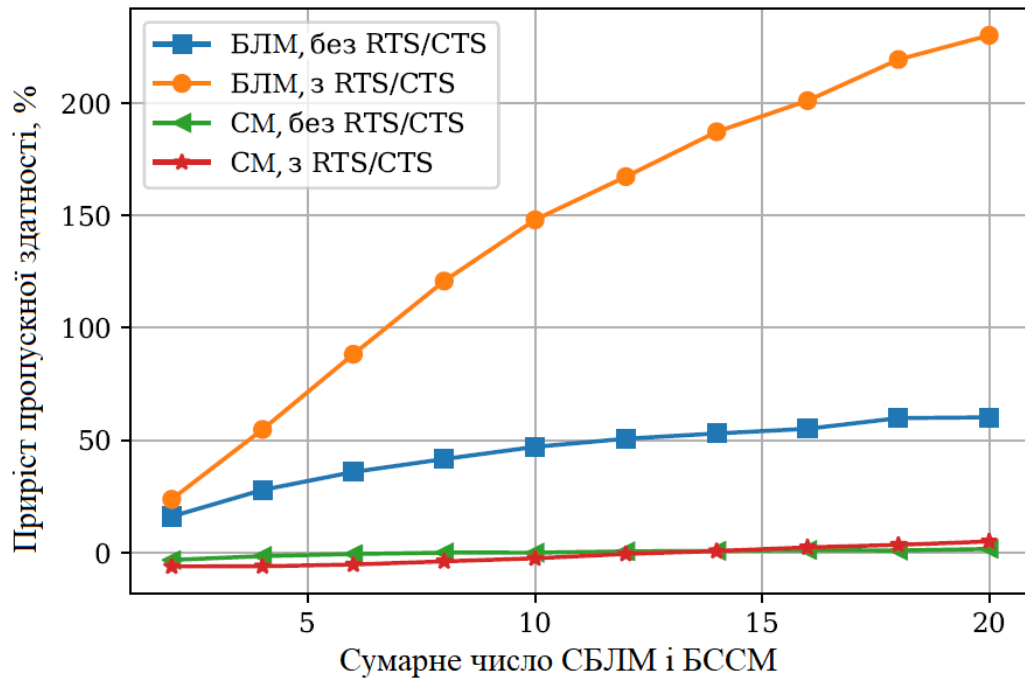


Рисунок 4.6 - Приріст пропускної спроможності, отриманий під час використання МДК порівняно з базовим підходом у сценарії 1

Розглянемо сценарій 2, у якому сумарне число БССМ і СБЛМ залишається фіксованим ( $N_w + N_l = 10$ ), але змінюється частка СБЛМ, див. рис. 4.7. Як і можна було очікувати, використання МДК у всіх випадках дозволяє підвищити пропускну здатність бездротової локальної мережі. Понад те, якщо число БССМ перевищує число СБЛМ, МДК дозволяє підвищити пропускну здатність обох мереж. Зазначимо, що МДК зменшує пропускну спроможність стільникової мережі порівняно з базовим підходом, якщо частка БССМ мала. Однак при цьому сумарна пропускну здатність обох мереж залишається приблизно однаковою, див. рис. 4.8. Варто зазначити, що зазначені висновки правильні як для випадку, коли СБЛМ використовують механізм RTS/CTS, так і для випадку, коли вони не використовують.

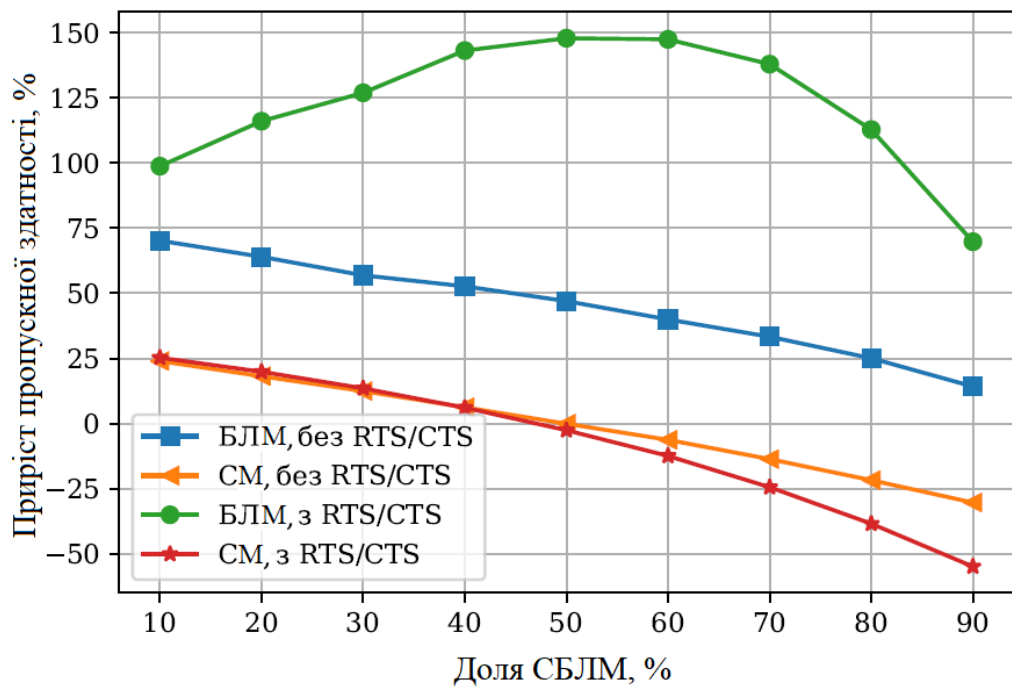


Рисунок 4.7 - Приріст пропускної спроможності, отриманий під час використання МДК порівняно з базовим підходом у сценарії 2

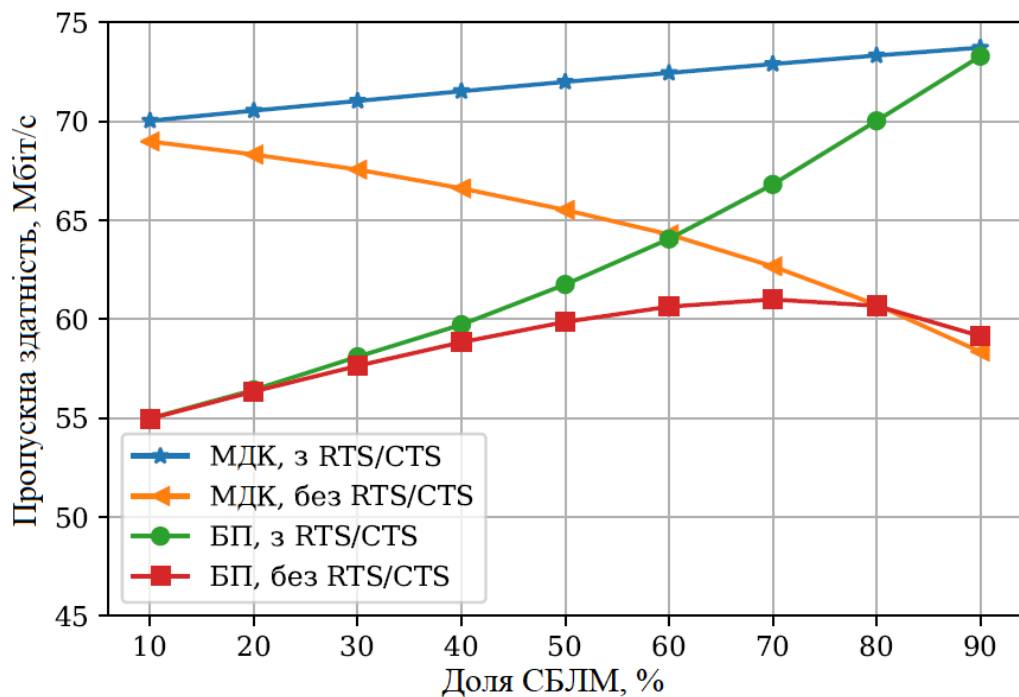


Рисунок 4.8 - Сумарна пропускна здатність обох мереж у сценарії 2

Зауважимо, що в попередніх експериментах був використаний тривалість слотів у ліцензованому каналі, що дорівнює 500 мкс, який характерний для стільникових мереж LTE-LAA четвертого покоління. У

розроблених в даний час стільникових мережах NR-U п'ятого покоління БССМ може адаптивно вибирати тривалість слотів в ліцензованому каналі, зокрема, вона може використовувати значення, рівні 250 або навіть 125 мкс, завдяки гнучкій нумерології.

Аналогічно сценарію 2, у сценарії 3 також розглядатимемо фіксоване загальне число БССМ і СБЛМ ( $N_w + N_l = 10$ ) і вивчимо вплив  $\theta$  на пропускну здатність при використанні як базового підходу, так і запропонованого методу дозволу колізій, див. рис. 4.9-4.10.

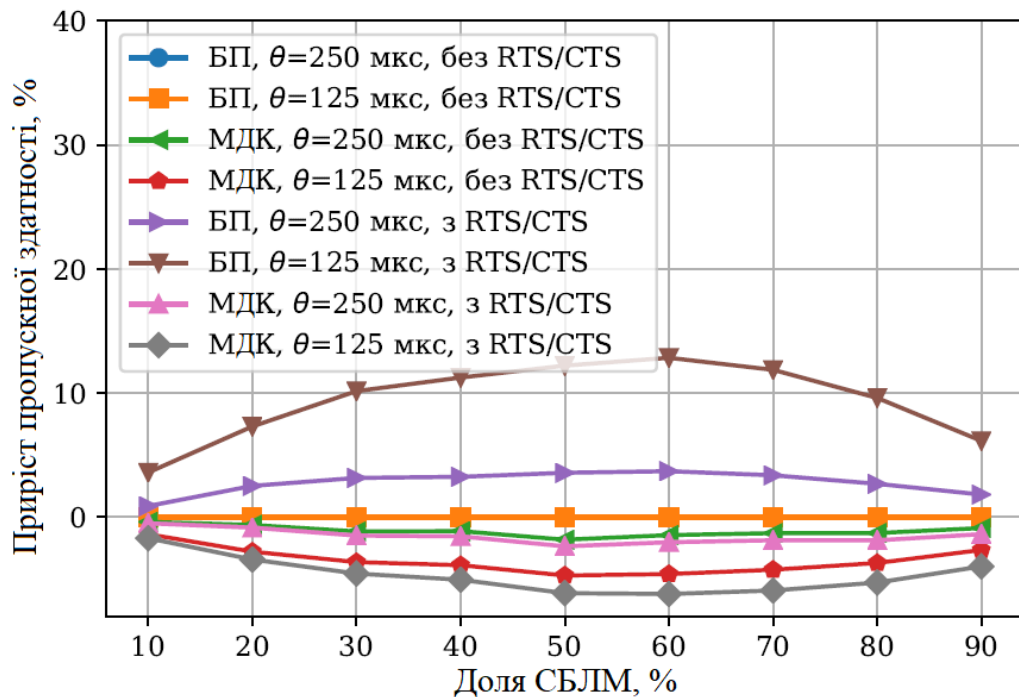


Рисунок 4.9 - Приріст пропускну здатності бездротової локальної мережі у разі, коли БССМ використовують  $\theta = 125; 250$  мкс, порівняно з випадком  $\theta = 500$  мкс у сценарії 3

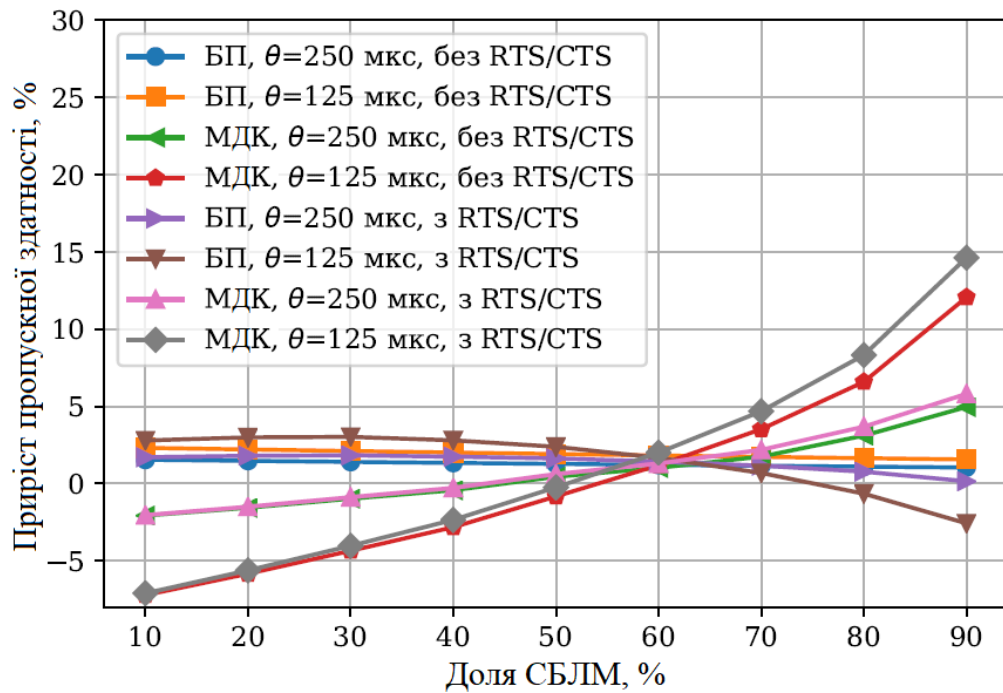


Рисунок 4.10 - Приріст пропускної спроможності стільникової мережі у разі, коли БССМ використовують:  $\theta = 125; 250$  мкс, порівняно з випадком  $\theta = 500$  мкс у сценарії 3

Проаналізуємо вплив тривалості  $\theta$  слотів у ліцензованому каналі на пропускну здатність бездротової локальної мережі, див. рис. 4.9. При використанні базового підходу з меншими значеннями пропускну здатність бездротової локальної мережі збільшується, якщо СБЛМ використовують механізм RTS/CTS. Збільшення пропускної спроможності відбувається через те, що знижується середня тривалість резервуючого сигналу що, у свою чергу, знижує ймовірність асиметричних колізій. При цьому, якщо СБЛМ не використовують механізм RTS/CTS, пропускну здатність бездротової локальної мережі не залежить від тривалості слотів у ліцензованому каналі, оскільки асиметричних колізій не відбувається. При використанні МДК з меншими значеннями пропускну здатність бездротової локальної мережі трохи зменшується в порівнянні з випадком  $\theta = 500$  мкс, так як зростає ймовірність того, що БССМ не задетектує початок передачі СБЛМ у разі колізії за участю БССМ і СБЛМ.

Перейдемо до розгляду впливу на пропускну здатність стільникової мережі. Якщо використовується базовий підхід, зменшення  $\theta$  трохи підвищує пропускну спроможність БССМ, проте її приріст не перевищує 3%. При використанні МДК пропускну здатність стільникової мережі трохи зменшується, оскільки зменшується середня кількість ДК-слотів, доступних для вирішення колізії. Крім того, якщо число БССМ мало, пропускну здатність стільникової мережі збільшується, тому що зростає можливість асиметричних колізій.

Підсумовуючи, відзначимо основні переваги запропонованого методу вирішення колізій:

- він дозволяє БССМ задетектувати колізію з передачею СБЛМ і дозволити колізію з передачею іншої БССМ;
- у разі колізії з передачею СБЛМ резервуючий сигнал БССМ впливає на прийом передачі СБЛМ настільки мало, наскільки це можливо;
- метод є повністю сумісним з поточною версією специфікацій стільникових мереж LTE-LAA/NR-U і не потребує будь-яких змін у СБЛМ;
- він дозволяє використовувати велику тривалість слотів у ліцензованому каналі без втрати пропускну спроможності, що значно зменшує складність користувальницьких пристроїв.

#### 4.5 Висновки до розділу 4

У четвертому розділі було розроблено метод дозволу колізій для БССМ, який дозволяє використовувати резервуючий сигнал для виявлення та дозволу колізії передач СБЛМ та БССМ. Для аналізу ефективності запропонованого методу була доведена теорема, що дозволяє знайти ймовірність дозволу колізії в залежності від часу, доступного для її вирішення, а також числа БССМ і СБЛМ, що беруть участь у колізії. За допомогою цієї теореми було знайдено оптимальні значення параметрів запропонованого методу, при яких

досягається максимальне значення ймовірності вирішення колізії. Крім того, за допомогою розробленої моделі було знайдено субоптимальне значення параметра, при якому досягається висока ймовірність дозволу колізії у випадку, коли точне число БССМ і СБЛМ, що потрапили до колізії, заздалегідь невідомо.

Для оцінки впливу запропонованого методу дозволу колізії на пропускну здатність бездротових локальних та стільникових мереж було побудовано аналітичну модель роботи системи з кількох БССМ та СБЛМ. У моделі передбачається, що всі БССМ використовують розроблений метод вирішення колізій. Було показано, що розроблений метод розв'язання колізій дозволяє покращити справедливість розподілу ресурсів та вирішити проблему асиметричних колізій БССМ та СБЛМ. За допомогою розробленої моделі було показано, що запропонований метод дозволу колізій дозволяє значно збільшити пропускну здатність бездротової локальної мережі, залишивши при цьому пропускну здатність стільникової мережі практично на такому ж високому рівні, як і при використанні базового підходу. Крім того, за допомогою розробленої аналітичної моделі було показано, що запропонований метод дозволів колізій дозволяє використовувати велику тривалість слотів в ліцензованому каналі без втрати пропускну спроможності, що значно зменшує складність користувальницьких пристроїв.

## 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

### 5.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах» можна охарактеризувати двома

показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	-	-	-
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	59	-	58
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	-	45	-
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	-	-	-
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	-	-	-
<b>Середнє значення балів експертів</b>		54,0		



Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 5.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	-	-	-
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	65	65	65
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	-	-	-
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	-	-	-
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	-	-	-
<b>Середнє значення балів експертів</b>	65,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (5.1)$$

де  $k_{нов}$ ,  $k_{теор}$  - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи,  $k_{нов} = 54,0$ ,  $k_{теор} = 65,0$  балів;

$0,6$  та  $0,4$  – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 54,0 + 0,4 \cdot 65,00 = 58,40 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника  $E_{нау}$  проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах», даний рівень становить 58,40 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

## 5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

### 5.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

#### *Основна заробітна плата дослідників*

Витрати на основну заробітну плату дослідників ( $Z_o$ ) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.2)$$

де  $k$  – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

$M_{ni}$  – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

$t_i$  – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці,  $T_p=24$  дні.

$$Z_o = 14800,00 \cdot 32 / 24 = 19733,33 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник проекту	14800,00	616,67	32	19733,33
Науковий співробітник	12600,00	525,00	28	14700,00
Інженер розробник телекомунікаційних систем	12000,00	500,00	24	12000,00
Інженер метролог	12000,00	500,00	24	12000,00
Технік 1-ї категорії	6980,00	290,83	20	5816,67
Всього				64250,00

*Основна заробітна плата робітників*

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.3)$$

де  $C_i$  – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

$t_i$  – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду  $C_i$  можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.4)$$

де  $M_M$  – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo  $M_M=6700,00$  грн;

$K_i$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б)

$K_c$  – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці, приблизно  $T_p = 24$  дн;

$t_{зм}$  – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,35 \cdot 1,65 / (24 \cdot 8) = 77,73 \text{ грн.}$$

$$Z_{p1} = 77,73 \cdot 24,00 = 1865,53 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Підготовка автоматизованих робочих місць дослідників	24,00	3	1,35	77,73	1865,53
Монтаж базового обладнання	32,00	5	1,70	97,88	3132,25
Наладка основних блоків дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах	12,00	5	1,70	97,88	1174,59
Контроль протікання експериментів	30,00	5	1,70	97,88	2936,48
Формування бази даних результатів досліджень	15,00	4	1,50	86,37	1295,51
Всього					10404,37

*Додаткова заробітна плата дослідників та робітників*

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де  $H_{\text{дод}}$  – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 12%.

$$Z_{\text{дод}} = (64250,00 + 10404,37) \cdot 12 / 100\% = 8958,52 \text{ грн.}$$

### 5.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (5.6)$$

де  $H_{zn}$  – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (64250,00 + 10404,37 + 8958,52) \cdot 22 / 100\% = 18394,84 \text{ грн.}$$

### 5.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали ( $M$ ), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\text{в}j}, \quad (5.7)$$

де  $H_j$  – норма витрат матеріалу  $j$ -го найменування, кг;

$n$  – кількість видів матеріалів;

$C_j$  – вартість матеріалу  $j$ -го найменування, грн/кг;

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ );

$B_j$  – маса відходів  $j$ -го найменування, кг;

$C_{vj}$  – вартість відходів  $j$ -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 3,00 \cdot 265,00 \cdot 1,1 - 0,000 \cdot 0,00 = 874,50 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір офісний А4	265,00	3 уп.	-	-	874,50
Папір для записів А5	162,00	4 уп.	-	-	712,80
Диск оптичний (CD-R)	22,00	3 шт.	-	-	72,60
Органайзер офісний	150,00	3 шт.	-	-	495,00
Канцелярське приладдя	230,00	4 компл.	-	-	1012,00
Тонер картриджа HP6000-A	5600,00	0,03	-	-	184,80
FLASH-пам'ять 64G	586,00	1 шт.	-	-	644,60
Всього					3996,30

#### 5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі ( $K_e$ ), які використовують при проведенні НДР на тему «Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.8)$$

де  $H_j$  – кількість комплектуючих  $j$ -го виду, шт.;

$C_j$  – покупна ціна комплектуючих  $j$ -го виду, грн;

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ ).

$$K_e = 1 \cdot 8400,00 \cdot 1,1 = 9240,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Мультидіапазонна антена у вигляді рейлінгів ANT-27-REILS	1	8400,00	9240,00
Квадроплексер для антен типу ANT-27	1	7800,00	8580,00
Антена на магнітній основі діапазону 1800/2100 MHZ	1	2600,00	2860,00
Аналізатор рівня сигналів VN-DU	1	7920,00	8712,00
Всього			29392,00

### 5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (5.9)$$

де  $C_i$  – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$  – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;



$K_i$  – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ( $K_i = 1,10 \dots 1,12$ );

$k$  – кількість найменувань устаткування.

$$B_{спец} = 20870,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 23165,70 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці.

Таблиця 5.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Приймально-передавальний блок стандарту LTE 1800/2600 (4 канали)	1	20870,00	23165,70
Приймально-передавальний блок стандарту GSM/LTE 900/1800 (4 канали)	1	35600,00	39516,00
Блок комутації сигналу GNSS VN-UBTS-SPLIT-GNSS	1	12360,00	13719,60
Блок комутації ВЧ сигналу мультідіапазонний VN-UBTS-SPLIT-NetMon	1	14790,00	16416,90
Всього			92818,20

### 5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{прог} = \sum_{i=1}^k C_{инпр} \cdot C_{прог.i} \cdot K_i, \quad (5.10)$$

де  $C_{инпр}$  – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прг.}i}$  – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ( $K_i = 1,10 \dots 1,12$ );

$k$  – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прг}} = 8320,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 9152,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці.

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
ОС Windows	1	8320,00	9152,00
Прикладний пакет Microsoft Office	1	7770,00	8547,00
Пакет Visual System Simulator	1	6350,00	6985,00
Пакет Microwave Office	1	6850,00	7535,00
Пакет Matlab 2020	1	5920,00	6512,00
Всього			38731,00

### 5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{\text{обл}} = \frac{Ц_{\text{б}}}{T_{\text{г}}} \cdot \frac{t_{\text{вик}}}{12}, \quad (5.11)$$

де  $Ц_{\text{б}}$  – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{\text{вик}}$  – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_e$  – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (32850,00 \cdot 2) / (3 \cdot 12) = 1825,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Персональний комп'ютер	32850,00	3	2	1825,00
Метрологічний комплекс	26400,00	4	2	1100,00
Автоматизовані місця дослідників	12560,00	5	2	418,67
Пристрої виводу інформації	6450,00	5	2	215,00
Управляючий термінал типу notebook	15550,00	3	2	863,89
Лабораторія досліджень	355000,00	25	2	2366,67
Всього				6789,22

### 5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію ( $B_e$ ) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{ени}}{\eta_i}, \quad (5.12)$$

де  $W_{yi}$  – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

$t_i$  – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

$C_e$  – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийємомо  $C_e = 6,12$  грн;

$K_{eni}$  – коефіцієнт, що враховує використання потужності,  $K_{eni} < 1$ ;

$\eta_i$  – коефіцієнт корисної дії обладнання,  $\eta_i < 1$ .

$$B_e = 0,25 \cdot 250,0 \cdot 6,12 \cdot 0,95 / 0,97 = 382,50 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер	0,25	250,0	382,50
Метрологічний комплекс	0,32	200,0	391,68
Автоматизовані місця дослідників	0,10	250,0	153,00
Пристрої виводу інформації	0,50	10,0	30,60
Управляючий термінал типу notebook	0,02	160,0	19,58
Приймально-передавальний блок стандарту LTE 1800/2600 (4 канали)	0,10	80,0	48,96
Приймально-передавальний блок стандарту GSM/LTE 900/1800 (4 канали)	0,10	80,0	48,96
Блок комутації сигналу GNSS VN-UBTS-SPLIT-GNSS	0,12	80,0	58,75
Блок комутації ВЧ сигналу мультідіапазонний VN-UBTS-SPLIT-NetMon	0,12	80,0	58,75
Аналізатор рівня сигналів VN-DU	0,08	160,0	78,34
Всього			1271,12

### 5.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (5.13)$$

де  $H_{cv}$  – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo  $H_{cv} = 22\%$ .

$$B_{cv} = (64250,00 + 10404,37) \cdot 22 / 100\% = 16423,96 \text{ грн.}$$

### 5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (5.14)$$

де  $H_{cn}$  – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo  $H_{cn} = 40\%$ .

$$B_{cn} = (64250,00 + 10404,37) \cdot 40 / 100\% = 29861,75 \text{ грн.}$$

### 5.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_{\text{в}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{ив}}}{100\%}, \quad (5.15)$$

де  $H_{\text{ив}}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo  $H_{\text{ив}} = 85\%$ .

$$I_{\text{в}} = (64250,00 + 10404,37) \cdot 85 / 100\% = 63456,21 \text{ грн.}$$

### 5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{\text{нзв}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{нзв}}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де  $H_{\text{нзв}}$  – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo  $H_{\text{нзв}} = 110\%$ .

$$B_{\text{нзв}} = (64250,00 + 10404,37) \cdot 110 / 100\% = 82119,80 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{одд} + Z_n + M + K_v + B_{стел} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (4.17)$$

$$B_{заг} = 64250,00 + 10404,37 + 8958,52 + 18394,83607 + 3996,30 + 29392,00 + 92818,20 + 38731,00 + 6789,22 + 1271,12 + 16423,96 + 29861,75 + 63456,21 + 82119,80 = 466867,30 \text{ грн.}$$

Загальні витрати  $ZB$  на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.18)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo  $\eta=0,85$ .

$$ZB = 466867,30 / 0,85 = 549255,64 \text{ грн.}$$

### 5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник  $K_p$  рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \quad (5.19)$$

де  $I$  – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo  $I = 4$ ;

$n$  – коефіцієнт використання результатів роботи;  $n = 0$ , коли результати роботи не будуть використовуватись;  $n = 1$ , коли результати роботи будуть використовуватись частково;  $n = 2$ , коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках;  $n = 3$ , коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo  $n = 3$ ;

$T_C$  – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo  $T_C = 2$ ;

$R$  – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то  $R = 4$ ; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то  $R = 3$ ; якщо нижче відомих результатів, то  $R = 1$ . Прийmemo  $R = 4$ ;

$B$  – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo  $B = 549255,64$  грн;

$t$  – час проведення дослідження. Прийmemo  $t = 0,17$  років, (2 міс.).

Визначення показників  $I$ ,  $n$ ,  $T_C$ ,  $R$ ,  $B$ ,  $t$  здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = \frac{4^3 \cdot 2 \cdot 4}{549,3 \cdot 0,17} = 5,59.$$

Якщо  $K_p > 1$ , то науково-дослідну роботу на тему «Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.



#### 5.4 Висновок до розділу 5

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах» складають 549255,64 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень науково-економічного ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи  $K_p > 1$ , що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

## **6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

Атестація робочих місць за умовами праці – це комплексна оцінка всіх чинників виробничого середовища і трудового процесу, супутніх соціально-економічних факторів, які впливають на здоров'я і працездатність працівників. Рекомендації з проведення атестації робочих місць за умовами праці, розроблені відповідно до постанови Кабінету Міністрів України № 442 від 01.08.1992 р., із змінами і доповненнями, внесеними роз'ясненням Міністерства праці України, Міністерства охорони здоров'я України № 06-960 від 22.03.1993 р., визначають організацію роботи з проведення атестації робочих місць, оцінку умов праці та реалізацію прав трудящих на пільги і компенсацію залежно від шкідливих і небезпечних виробничих факторів.

Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах буде відбуватися в приміщені, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На дослідника, згідно ГОСТ 12.0.003-74, можуть мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

Відповідно до визначених факторів формуємо рішення щодо безпечного виконання роботи.

## 6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання досліджень

### 6.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці. Це гарантує Конституція України (ч. 4 ст. 43). Більш детальні вимоги щодо охорони праці, зокрема охорони праці під час роботи із використанням ПК, містять Кодекс законів про працю, Закон України «Про охорону праці», а також інші підзаконні нормативно-правові акти. У відповідності до вимог ст. 153 Кодексу законів про працю України та ст. 6 Закону України «Про охорону праці» на всіх підприємствах, в установах, організаціях створюються безпечні і нешкідливі умови праці. Забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці покладається на власника або уповноважений ним орган. Умови праці на робочому місці, безпека технологічних процесів, машин, механізмів, устаткування та інших засобів виробництва, стан засобів колективного та індивідуального захисту, що використовуються працівником, а також санітарно-побутові умови повинні відповідати вимогам нормативних актів про охорону праці. Власник або уповноважений ним орган повинен впроваджувати сучасні засоби техніки безпеки, які запобігають виробничому травматизму, і забезпечувати санітарно-гігієнічні умови, що запобігають виникненню професійних захворювань працівників.

Організація робочого місця розробника радіовимірювального частотного сенсору температури для спеціалізованих хмарних платформ повинна забезпечувати відповідність всіх його елементів і їхнього розташування ергономічним вимогам та особливостям трудової діяльності.

Робочі місця працівників, обладнані ПК, повинні відповідати вимогам НПА ОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. Правила поширюються на всіх суб'єктів господарювання незалежно від форм власності, які у своїй діяльності здійснюють роботу, пов'язану з персональними комп'ютерами, у тому числі

на тих, які мають робочі місця, обладнані персональними комп'ютерами і периферійними пристроями. Зазначені нормативно-правові акти встановлюють санітарно-гігієнічні вимоги до приміщення, в якому розташоване робоче місце, власне до робочого місця, освітлення, рівнів вібрації і шуму, мікроклімату в приміщенні тощо.

### 6.1.2 Електробезпека приміщення

В досліджуваному приміщенні лінія електромережі для живлення ПК, периферійних пристроїв ПК й устаткування для обслуговування, ремонту й налагодження ПК виконана як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазових, нульових робочих і нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення електроприймачів.

Нульовий захисний провідник прокладається від стійки групового розподільного щита, розподільного пункту до розеток електроживлення. Не допускається підключати на щиті до одного контактного затискача нульовий робочий та нульовий захисний провідники. Площа перерізу нульового робочого та нульового захисного провідника в груповій трипровідній мережі має бути не менше площі перерізу фазового провідника. Усі провідники відповідають номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму та типам апаратури захисту.

Персональні комп'ютери, периферійні пристрої, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники), електропроводи та кабелі за виконанням і ступенем захисту відповідають класу зони, мають апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів. Під час монтажу та експлуатації ліній електромережі необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів,

обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, застосовувати негорючу ізоляцію.

Приміщення, в якому відбуватиметься дослідження за класом електробезпеки – це приміщення без підвищеної небезпеки, оскільки фактори підвищеної та особливої небезпеки на робочому місці відсутні.

Покриття плит підлоги гладке, міцне, антистатичне, зручним для очищення пирососом та для проведення вологого прибирання. Необхідно забезпечувати відвід статичних зарядів з покриття підлоги. Для протирання підлоги застосовують рідини, пари яких не утворюють вибухо- та пожежебезпечних сумішей з повітрям і не викликає корозії контактів електричних сполук.

Тимчасова електропроводка від переносних приладів до джерел живлення виконується найкоротшим шляхом таким чином, щоб уникнути заплутування проводів у конструкціях машин, приладів і меблів.

## 6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 6.2.1 Мікроклімат

Робота дослідника несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах згідно за енерговитратами відноситься до категорії 1а.

Допустимі параметри мікроклімату для категорії 1а наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – 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 підтримки оптимального рівня мікроклімату в приміщенні передбачено систему кондиціонування повітря з індивідуальним регулюванням температури, систему центрального опалення і вентиляції та систематичне вологе прибирання приміщення.

### 6.2.2 Склад повітря робочої зони

В приміщенні, де здійснюється Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах, можливими шкідливими речовинами у повітрі є фенол, пил, озон та вуглекислий газ. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, згідно ДСН 3.3.6.042-99 які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м <sup>3</sup>		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Фенол	0,01	0,01	3
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	4
Вуглекислий газ	3	1	4

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл. 6.3).

Таблиця 6.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

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

Забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється за допомогою системи кондиціонування, регулярного провітрювання, та вологого прибирання.

### 6.2.3 Виробниче освітлення

Приміщення, в яких встановлені персональні комп'ютери, повинні мати природне та штучне освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28-2006.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні (згідно ДБН В.2.5-28-2006) зазначені у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, %			
						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

Штучне освітлення в приміщенні здійснюється системою загального рівномірного освітлення. У разі переважної роботи з документами, допускається застосування системи комбінованого освітлення (крім системи загального освітлення додатково встановлюються світильники місцевого освітлення). Зазначення освітленості на поверхні робочого столу в зоні розміщення документів має становити 300-500лк. Якщо ці значення освітленості неможливо забезпечити системою загального освітлення, допускається використовувати місцеве освітлення. При цьому світильники місцевого освітлення слід встановлювати таким чином, щоб не створювати відблисків на поверхні екрана, а освітленість екрана має не перевищувати 300лк. Як джерела світла в разі штучного освітлення мають застосовуватись переважно люмінесцентні лампи типу ЛБ.

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



#### 6.2.4 Виробничий шум

Джерелами шуму під час дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах є працююча техніка та транспорт, який рухається ззовні приміщення.

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99.

Таблиця 6.5 - Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі та стін;
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори;
- встановити металопластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

### 6.2.5 Виробничі випромінювання

Робоче місце дослідника несанкціонованого доступу до радіотракту в безпроводних локальних та мобільних мережах обладнане ПК, який є джерелом електромагнітного випромінювання.

Ступінь впливу електромагнітних випромінювань від ПК на організм працівника залежить від діапазону частот, тривалості опромінення, характеру опромінення, режиму опромінення, розмірів поверхні тіла, яке опромінюється, та індивідуальних особливостей організму.

Електромагнітні випромінювання, випромінювані відеодисплейним терміналом, 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 наведені в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6 - Допустимі параметри електромагнітних неіонізуючих випромінювань і електростатистичного поля

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії, Вт/кв.м
	за електричною складовою (E), В/м	за магнітною складовою (H), А/м	
Напруженість електромагнітного поля 60 кГц до 3 мГц	50	5	
Напруженість електромагнітного поля 3 кГц до 30 мГц	20		
Напруженість електромагнітного поля 30 кГц до 50 мГц	10	0,3	
Напруженість електромагнітного поля 30 кГц до 300 мГц 5	5		

## Продовження таблиці 6.6

Напруженість електромагнітного поля 300 кГц до 300 ГГц			10Вт/кв. м
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-С (220 — 280 нм)			0,001
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-В (280 — 320 нм)			0,01
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-А (320 — 400 нм)			10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в видимій частині спектру 400 — 760 нм			10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в інфрачервоній частині спектру 0,76 — 10,0 мкм			35,0 — 70,0
Напруженість електричного поля відеодисплейного терміналу			20кВ/м

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

## 6.2.6 Напруженість праці

Основними показниками напруженості праці є: тривалість зосередження уваги або щільність сигналів, ступінь ризику для власного життя та життя

інших осіб або ступінь відповідальності за життя інших осіб, змінність при роботі виключно в нічну зміну.

Гігієнічна оцінка важкості та напруженості праці проводиться шляхом додавання відношень вимірюваних або розрахованих показників до їх допустимих рівнів, помножених на коефіцієнт значимості показника (1,0 - для основних показників, 0,15 - для допоміжних).

Клас та ступінь важкості й напруженості праці визначаються відповідно до розрахованих балів (сума відношень основних та допоміжних показників до їх нормативних рівнів, помножених на відповідний коефіцієнт) згідно з таблицею 6.7 найвищі клас та ступінь за факторами «важкість» або «напруженість» трудового процесу - 3 клас, 3 ступінь (особливо важка або особливо напружена праця).

Таблиця 6.7 Класи умов праці за показниками напруженості праці

№ з/п	Показники напруженості трудового процесу	Класи умов праці			
		оптимальний (напруженість праці легкого ступеня)	допустимий (напруженість праці середнього ступеня)	шкідливий (напружена праця)	
		1	2	3.1	3.2
1	2	3	4	5	6
1*	Інтелектуальні навантаження				
1.1	Зміст роботи	Відсутня необхідність прийняття рішення	Рішення простих альтернативних завдань згідно з інструкцією	Рішення складних завдань з вибором за алгоритмом (робота за серією інструкцій)	Евристична діяльність, що вимагає вирішення складних завдань за відсутності алгоритму; особисте керівництво в складних ситуаціях

Продовження таблиці 6.7

1. 2	Сприймання сигналів (інформації) та їх оцінка	Сприймання сигналів, але немає потреби в корекції дій	Сприймання сигналів з наступною корекцією дій та операцій	Сприймання сигналів з наступним порівнянням фактичних значень параметрів з їх номінальними значеннями. Заключна оцінка фактичних значень параметрів	Сприймання сигналів з наступною комплексною оцінкою взаємопов'язаних параметрів. Комплексна оцінка всієї виробничої діяльності
1. 3	Розподіл функцій за ступенем складності завдання	Обробка та виконання завдання	Обробка, виконання завдання та його перевірка	Обробка, перевірка і контроль за виконанням завдання	Контроль та попередня робота з розподілу завдань іншим особам
1. 4	Характер виконуваної роботи	Робота за індивідуальним планом	Робота за встановленим графіком з можливим його коригуванням під час діяльності	Робота в умовах дефіциту часу	Робота в умовах дефіциту часу та інформації з підвищеною відповідальністю за кінцевий результат
2	Сенсорні навантаження	-	-	-	-
2. 1	Тривалість зосередження уваги (в % від часу зміни)	До 50	51-75	Більше 75	-

## Продовження таблиці 6.7

2.2	Щільність сигналів (світлових, звукових) та повідомлень в середньому за 1 годину роботи	До 150	151-300	Більше 300	-
2.3	Навантаження на зоровий аналізатор	-	-	-	-
2.3.1	Розмір об'єкта розрізнення (при відстані від очей працюючого до об'єкта розрізнення не більше 0,5 м), мм, % часу зміни	Більше 5 мм 100% часу	5,0-1,1 мм більше 50% часу; 1,0-0,3 мм до 50 % часу; менше 0,3 мм до 25% часу	1,0-0,3 мм більше 50% часу; менше 0,3 мм 25-50% часу	Менше 0,3 мм більше 50% часу, у тому числі з використанням оптичних приладів
2.3.2	Спостереження за екранами відеотерміналів, годин на зміну	До 2	До 4	> 4,1-6	Більше 6
2.4	Навантаження на слуховий аналізатор (при виробничій необхідності сприйняття мови чи диференційованих сигналів)	Розбірливість слів та сигналів від 100% до 90%	Розбірливість слів та сигналів від 90% до 70%	Розбірливість слів та сигналів від 50% до 70%	Розбірливість слів та сигналів менше 50%
2.5	Навантаження на голосовий апарат, сумарна кількість годин, з напруженням голосового апарату протягом тижня	До 16	Від 16 до 20	Від 20 до 25	Більше 25

Продовження таблиці 6.7

3	Емоційне навантаження	-	-	-	-
3.1	Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності. Значущість помилки	Є відповідальним за виконання окремих елементів завдання. Вимагає додаткових зусиль в роботі з боку працівника	Є відповідальним за функціональну якість допоміжних робіт (завдань). Вимагає додаткових зусиль з боку керівництва (бригадира, майстра тощо)	Є відповідальним за функціональну якість основної роботи (завдання). Вимагає виправлень за рахунок додаткових зусиль всього колективу (групи, бригади тощо)	Є відповідальним за кінцевої продукції, роботи, завдання. Неправильні рішення можуть призвести до пошкодження обладнання, зупинки технологічного процесу, можливої небезпеки для життя
3.2	Ступінь ризику для власного життя та життя інших осіб	Виключений	-	-	Вірогідний
3.3	Ступінь відповідальності за безпеку інших осіб	Виключений	-	Є відповідальним за безпеку	-
4	Монотонність навантажень	-	-	-	-

## Продовження таблиці 6.7

4.1	Кількість елементів (прийомів), необхідних для реалізації простого завдання або в операціях, які повторюються багаторазово	Більше 10	10-6	5-2	-
4.2	Тривалість виконання простих виробничих завдань чи операцій, що повторюються, с	Більше 100	100-25	24-2	-
4.3	Монотонність виробничої обстановки, час пасивного спостереження за технологічним процесом в % від часу зміни	Менше 75	76-90	91-95	-
5	Режим праці	-	-	-	-
5.1	Тривалість робочого дня, год.	6 або 7	8	Більше 8	-
5.2	Змінність роботи	Однозмінна робота (без нічної зміни)	Двозмінна робота (без нічної зміни)	Тризмінна робота (з роботою в нічну зміну)	Нерегулярна змінність з роботою в нічний час, робота виключно в нічну зміну**

Згідно з наведеними даними таблиці 6.7 при плануванні розпорядку робочого дня і навантаження на працівника потрібно враховувати всі умови оптимальних умов праці.



### 6.3 Основні засади радіаційного захисту

Підґрунтям розробки заходів радіаційного захисту і забезпечення радіаційної безпеки є рекомендації Міжнародного агентства з атомної енергетики (МАГАТЕ) та Міжнародного комітету радіаційного захисту (МКРЗ), а також нормативноправові документи, які регулюють відносини у цій сфері. Верховна Рада України прийняла цілу низку законів щодо захисту від іонізуючого випромінювання: “Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку”, “Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання”, “Про поводження з радіоактивними відходами”, “Про статус території, яка зазнала радіоактивного забруднення від Чорнобильської катастрофи” та інші. Внесені також значні зміни в Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97/Д-2000) та Основні санітарні правила щодо захисту від іонізуючого випромінювання. Закон України “Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку” встановлює пріоритет радіаційної безпеки населення і навколишнього природного середовища в Україні. У ньому визначено принципи радіаційної безпеки, суть яких зводиться до наступного: не перевищення встановленої основної межі дози опромінення; виключення будь-якого необґрунтованого опромінення; зниження дози опромінення до можливо низької межі. Законом України “Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання” у медицині заборонено застосовувати іонізуюче випромінювання для профілактичних обстежень і лікування, якщо йому є альтернатива. Чинним законодавством встановлені чотири групи радіаційно-гігієнічних регламентів щодо обмеження опромінення: при нормальній практичній діяльності; від техногеннопідсилених джерел природного походження; медичного опромінення; аварійного опромінення.

## ВИСНОВКИ

У цій магістерській дипломній роботі проведено дослідження в галузі методів випадкового доступу до загального неліцензованому каналу в бездротових локальних та стільникових мережах. Зокрема, отримано такі результати:

- Проведено порівняльний аналіз методів випадкового доступу в бездротових локальних та стільникових мережах, а також огляд відкритих проблем їх спільного існування в загальному неліцензованому каналі.

- Розроблено аналітичну модель роботи в загальному неліцензованому каналі системи з декількох базових станцій стільникових мереж (БССМ) і станцій бездротової локальної мережі (СБЛМ), що враховує наявність асиметричних колізій БССМ і СБЛМ і дозволяє оцінити пропускну здатність обох мереж за умови методу доступу до каналу з резервуючим сигналом.

- Розроблено аналітичну модель роботи в загальному неліцензованому каналі системи з декількох БССМ і СБЛМ для випадку, коли БССМ використовують метод доступу без резервуючого сигналу, що дозволяє оцінити пропускну здатність обох мереж і визначити область значень параметрів методу доступу базової станції стільникової мережі, в якій досягається справедливий і ефективний поділ каналних ресурсів між пристроями різних технологій.

- Розроблено метод дозволу колізій для базових станцій стільникових мереж, який дозволяє виявляти та дозволяти колізії передач БССМ і СБЛМ, що призводить до збільшення пропускну спроможності обох мереж до 30%, а пропускну спроможності бездротової локальної мережі – до 2 разів, а також покращити справедливість поділу каналних ресурсів між пристроями бездротової локальної та стільникових мереж.

- Розроблено аналітичну модель роботи системи з СБЛМ та БССМ, що використовують запропонований метод дозволу колізій, що дозволяє оцінити ймовірність дозволу колізії, знайти субоптимальні значення параметрів

запропонованого методу, а також знайти пропускні здатності бездротової локальної та стільникової мереж.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Loginov V.A., Lyakhov A.I., Khorov E.M. Coexistence of Wi-Fi and LTE-LAA Networks: Open Issues // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2018. Vol. 63, no. 12. Pp. 1530–1537.
2. Kutsevol P.N., Loginov V.A., Lyakhov A.I., Khorov E.M. Mathematical Modeling of Joint Operation of Wireless Local Area Networks and Fifth Generation Cellular Networks // *Automation and Remote Control*. 2019. Vol. 80, no. 12. Pp. 2180–2194.
3. Kutsevol Polina, Loginov Vyacheslav, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey. Analytical Study of License-Assisted Access in 5G Networks // *2019 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) / IEEE*. 2019. Pp. 1–9.
4. Kutsevol Polina, Loginov Vyacheslav, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey. New Collision Detection Method for Fair LTE-LAA and Wi-Fi Coexistence // *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) / IEEE*. 2019. Pp. 1–6.
5. Loginov Vyacheslav, Lyakhov Andrey, Zhdanovskiy Vyacheslav. Performance Analysis of LBT with Limited Reservation Signal Duration for Fair LTE-LAA/Wi-Fi Coexistence // *2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (Black-SeaCom) / IEEE*. 2019. Pp. 1–5.
6. Куцевол П.Н., Логинов В.А., Ляхов А.И. Аналитическая модель метода доступа к нелицензируемой полосе в сетях 5G // *Сборник трудов 42-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН «Информационные технологии и системы 2018»*. 2018. С. 266–278.
7. Ждановский В.Д., Логинов В.А., Ляхов А.И. Анализ эффективности сетей LTE-LAA при использовании резервирующего сигнала ограниченной длительности // *Сборник трудов 42-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН «Информационные технологии и системы 2018»*. 2018. С. 256–265.

8. Khorov Evgeny, Kutsevol Polina, Loginov Vyacheslav, Lyakhov Andrey. Wireless Collision Detection for Fair LAA/Wi-Fi Coexistence // 2019 July IEEE 802.11 Coexistence Work- shop / IEEE. 2019.
9. Cisco. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Up- date, 2017–2022 White Paper, 2019 // Online: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.html>.
10. Taha Abd-Elhamid M, Ali Najah Abu, Hassanein Hossam S. LTE, LTE-advanced and WiMAX: Towards IMT-advanced Networks. John Wiley & Sons, 2011.
11. GSA. Progress to Gigabit LTE Networks – May Update, 2018 // Online: <https://gsacom.com/paper/progress-gigabit-lte-networks-may-update/>.
12. O'hara Bob, Petrick Al. IEEE 802.11 handbook: a designer's companion. IEEE Standards Association, 2005.
13. Perahia Eldad, Stacey Robert. Next generation wireless LANs: 802.11 n and 802.11 ac. Cambridge university press, 2013.
14. IEEE. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Spec- ifications, 2016.
15. Khorov E., Kiryanov A., Lyakhov A., Bianchi G. A Tutorial on IEEE 802.11ax High Effi- ciency WLANs // IEEE Communications Surveys Tutorials. 2019. — Firstquarter. Vol. 21, no. 1. Pp. 197–216.
16. Ho Quang-Dung, Tweed Daniel, Le-Ngoc Tho. Requirements and regulations in the 5 ghz unlicensed spectrum // Long term evolution in unlicensed bands. Springer, 2017. Pp. 11–20.
17. Cano Cristina, Lopez-Perez David, Claussen Holger, Leith Douglas J. Using LTE in unli- censed bands: Potential benefits and coexistence issues // IEEE communications magazine. 2016. Vol. 54, no. 12. Pp. 116–123.

18. ETSI. 301 893 V1.7.2 (2014-07): Broadband radio access networks (BRAN); 5 GHz high performance RLAN; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive. 2014.
19. Labib Mina, Reed Jeffrey H, Martone Anothony F, Zaghloul Amir I. Coexistence between radar and LTE-U systems: Survey on the 5 GHz band // 2016 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM) / IEEE. 2016. Pp. 1–2.
20. Xia Pengfei, Teng Zi, Wu Jun. How loud to talk and how hard to listen-before-talk in unlicensed LTE // 2015 IEEE international conference on communication workshop (ICCW) / IEEE. 2015. Pp. 2314–2319.
21. Jindal N, Breslin D. LTE and Wi-Fi in unlicensed spectrum: A coexistence study // Google white paper. 2015.
22. Cui Haixia, Leung Victor CM, Li Shaoqian, Wang Xianbin. LTE in the unlicensed band: Overview, challenges, and opportunities // IEEE Wireless Communications. 2017. Vol. 24, no. 4. Pp. 99–105.
23. Yi Jaehong, Sun Weiping, Park Seungkeun, Choi Sunghyun. Performance analysis of LTE-LAA network // IEEE Communications Letters. 2017. Vol. 22, no. 6. Pp. 1236–1239.
24. Mehrnoush Morteza, Sathya Vanlin, Roy Sumit, Ghosh Monisha. Analytical modeling of Wi-Fi and LTE-LAA coexistence: Throughput and impact of energy detection threshold // IEEE/ACM Transactions on Networking (TON). 2018. Vol. 26, no. 4. Pp. 1990–2003.
25. Cano Cristina, Leith Douglas J. Unlicensed LTE/WiFi coexistence: Is LBT inherently fairer than CSAT? // 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC) / IEEE. 2016. Pp. 1–6.
26. Mehrnoush Morteza, Roy Sumit, Sathya Vanlin, Ghosh Monisha. On the fairness of Wi-Fi and LTE-LAA coexistence // IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. 2018. Vol. 4, no. 4. Pp. 735–748.

27. 3GPP. Study on NR-based access to unlicensed spectrum: Technical Report (TR) 38.889: 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2018. — 12. Version 16.0.0. URL: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38889.htm>.
28. Kim Younsun, Kim Youngbum, Oh Jinyoung et al. New Radio (NR) and its Evolution toward 5G-Advanced // *IEEE Wireless Communications*. 2019. Vol. 26, no. 3. Pp. 2–7.
29. Ng Boon Loong, Si Hongbo, Papasakellariou Aris, Zhang Jianzhong Charlie. Unified access in licensed and unlicensed bands in LTE-A Pro and 5G // *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*. 2017. Vol. 6.
30. Lagen Sandra, Giupponi Lorenza, Goyal Sanjay et al. New Radio Beam-based Access to Unlicensed Spectrum: Design Challenges and Solutions // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019.
31. Ekman Reijo, Väre Jani, Jokela Tero et al. Trials of 60 GHz Radio for a Future 5G New Radio (NR) Solution for High Capacity CCTV Offload and Multimedia Transfer // *2019 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB) / IEEE*. 2019. Pp. 1–6.
32. Lu Xi, Sopin Eduard, Petrov Vitaly et al. Integrated use of licensed-and unlicensed-band mmWave radio technology in 5G and beyond // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 24376–24391.
33. 3GPP R1-1808318: Discussion on frame structure for NR-U: Tech. rep.: ZTE, 2018. — August.
34. Series M. IMT Traffic estimates for the years 2020 to 2030 // *Recommendation ITU*. 2015. Pp. 2083–0.
35. Anastasi Giuseppe, Borgia Eleonora, Conti Marco, Gregori Enrico. Wi-fi in ad hoc mode: a measurement study // *Second IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications*, 2004. Proceedings of the / *IEEE*. 2004. Pp. 145–154.
36. Shen Zukang, Papasakellariou Aris, Montojo Juan et al. Overview of 3GPP LTE-advanced carrier aggregation for 4G wireless communications // *IEEE Communications Magazine*. 2012. Vol. 50, no. 2. Pp. 122–130.

37. Zhang Jingjing, Wang Mao, Hua Min et al. LTE on License-exempt Spectrum // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017. Vol. 20, no. 1. Pp. 647–673.
38. Labib Mina, Marojevic Vuk, Reed Jeffrey H, Zaghoul Amir I. Extending LTE into the unlicensed spectrum: Technical analysis of the proposed variants // *IEEE Communications Standards Magazine*. 2017. Vol. 1, no. 4. Pp. 31–39.
39. 3GPP. Physical layer procedures for shared spectrum channel access: Technical specification (TS) 37.213: 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2020. — 1. Version 16.0.0. URL: <http://www.3gpp.org/DynaReport/37213.htm>.
40. 3GPP R1-156862: Reservation signal in LAA: Tech. rep.: LG Electronics, 2015. — November.
41. Jian Yubing, Shih Chao-Fang, Krishnaswamy Bhuvana, Sivakumar Raghupathy. Coexistence of Wi-Fi and LAA-LTE: Experimental evaluation, analysis and insights // *2015 IEEE international conference on communication workshop (ICCW) / IEEE*. 2015. Pp. 2325–2331.
42. Ghosh Amitabha, Maeder Andreas, Baker Matthew, Chandramouli Devaki. 5G evolution: A view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15 // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 127639–127651.
43. GSA. Global mobile Suppliers Association: Unlicensed & Shared Spectrum Report – July 2019. URL: <https://gsacom.com/paper/progress-gigabit-lte-networks-may-update/>.
44. 3GPP. Feasibility Study on Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum: Technical Report (TR) 36.889: 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2015. — 07. Version 13.0.0. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2579>.
45. Keyhanian Aliasghar, Leivadreas Aris, Lambadaris Ioannis, Marmokos Ioannis. Analyzing the coexistence of Wi-Fi and LAA-LTE towards a proportional throughput fairness // *Proceedings of the 16th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access*. 2018. Pp. 95–101.



46. Cano Cristina, Leith Douglas J. Coexistence of WiFi and LTE in unlicensed bands: A proportional fair allocation scheme // 2015 IEEE international conference on communication workshop (ICCW) / IEEE. 2015. Pp. 2288–2293.
47. Babaei Alireza, Andreoli-Fang Jennifer, Pang Yimin, Hamzeh Belal. On the impact of LTE-U on Wi-Fi performance // International Journal of Wireless Information Networks. 2015. Vol. 22, no. 4. Pp. 336–344.
48. Sathya Vanlin, Mehrnoush Morteza, Ghosh Monisha, Roy Sumit. Analysis of CSAT performance in Wi-Fi and LTE-U Coexistence // 2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops) / IEEE. 2018. Pp. 1–6.
49. Abdelfattah Amr, Malouch Naceur. Modeling and performance analysis of Wi-Fi networks coexisting with LTE-U // IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications / IEEE. 2017. Pp. 1–9.
50. Bajracharya Rojeena, Shrestha Rakesh, Kim Sung Won. Q-Learning Based Fair and Efficient Coexistence of LTE in Unlicensed Band // Sensors. 2019. Vol. 19, no. 13. P. 2875.
51. de Santana Pedro Maia, Neto Jos'e Martins Castro, Abinader Jr Fuad M, de Sousa Jr Vicente A. GTDM-CSAT: an LTE-U self Coexistence Solution based on Game Theory and Reinforcement Learning // Journal of Communication and Information Systems. 2019. Vol. 34, no. 1. Pp. 169–177.
52. Yang Min, Song Yaoliang, Cai Changxin, Gu Hao. Blind LTE-U/WiFi Coexistence System Using Convolutional Neural Network // IEEE Access. 2019. Vol. 8. Pp. 15923–15930.
53. Maglogiannis Vasilis, Naudts Dries, Shahid Adnan, Moerman Ingrid. A Q-learning scheme for fair coexistence between LTE and Wi-Fi in unlicensed spectrum // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 27278–27293.
54. Maule Massimiliano, Moltchanov Dmitri, Kustarev Pavel et al. Delivering fairness and QoS guarantees for LTE/Wi-Fi coexistence under LAA operation // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 7359–7373.

55. Markova Ekaterina, Moltchanov Dmitri, Gudkova Irina et al. Performance assessment of QoS-aware LTE sessions offloading onto LAA/WiFi systems // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 36300–36311.
56. Cierny Michal, Nihtila Timo, Huovinen Toni et al. Fairness vs. Performance in Rel-13 LTE Licensed Assisted Access // *IEEE Communications Magazine*. 2017. Vol. 55, no. 12. Pp. 133–139.
57. Wang Hua, Kuusela Markku, Rosa Claudio, Sorri Antti. Enabling frequency reuse for li- censed-assisted access with listen-before-talk in unlicensed bands // *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2016 IEEE 83rd / IEEE*. 2016. Pp. 1–5.
58. Yi Jaehong, Sun Weiping, Park Seungkeun, Choi Sunghyun. Performance Analysis of LTE-LAA Network // *IEEE Communications Letters*. 2018. Vol. 22, no. 6. Pp. 1236–1239.
59. Song Yujae, Sung Ki Won, Han Youngnam. Coexistence of Wi-Fi and Cellular with Lis- ten-before-talk in Unlicensed Spectrum // *IEEE Communications Letters*. 2016. Vol. 20, no. 1. Pp. 161–164.
60. Gao Yuan, Chu Xiaoli, Zhang Jie. Performance analysis of LAA and WiFi coexistence in unlicensed spectrum based on Markov chain // *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) / IEEE*. 2016. Pp. 1–6.
61. Giupponi Lorenza, Henderson Thomas, Bojovic Biljana, Miozzo Marco. Simulating LTE and Wi-Fi coexistence in unlicensed spectrum with NS-3 // Online: <https://arxiv.org/abs/1604.06826>arXivpreprintarXiv:1604.06826. 2016.
62. Nurchis Maddalena, Bellalta Boris. Performance Evaluation of LAA-LTE and WiFi Coex- istence in Unlicensed 5 GHz Band Under Asymmetric Network Deployments Using NS3 // *International Workshop on Multiple Access Communications / Springer*. 2016. Pp. 86–97.
63. Bojovi'c Biljana, Giupponi Lorenza, Ali Zoraze, Miozzo Marco. Evaluating Unlicensed LTE Technologies: LAA vs LTE-U // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 89714–89751.

64. Khairy Sami, Cai Lin X, Cheng Yu et al. A Hybrid-LBT MAC with Adaptive Sleep for LTE LAA Coexisting with Wi-Fi over Unlicensed Band // GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference / IEEE. 2017. Pp. 1–6.
65. Tang Zhenzhou, Zhou Xuesheng, Chen Qimei et al. Adaptive - Persistent LBT for Unlicensed LTE: Performance Analysis and Optimization // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. Vol. 68, no. 9. Pp. 8744–8758.
66. Chen Qimei, Yu Guanding, Ding Zhi. Enhanced LAA for unlicensed LTE deployment based on TXOP contention // IEEE Transactions on Communications. 2018. Vol. 67, no. 1. Pp. 417–429.
67. Ali Rashid, Shahin Nurullah, Musaddiq Arslan et al. Fair and Efficient Channel Observation-Based Listen-Before Talk (CoLBT) for LAA-WiFi Coexistence in Unlicensed LTE // 2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN) / IEEE. 2018. Pp. 154–158.
68. Iqbal Muhammad, Rochman Cholilur, Sathya Vanlin, Ghosh Monisha. Impact of Changing Energy Detection Thresholds on Fair Coexistence of Wi-Fi and LTE in the Unlicensed Spectrum // Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 2017 / IEEE. 2017. Pp. 1–9.
69. Li Li, Seymour James P, Cimini Leonard J, Shen Chien-Chung. Coexistence of Wi-Fi and LAA networks with adaptive energy detection // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66, no. 11. Pp. 10384–10393.
70. Mafakheri Babak, Goratti Leonardo, Riggio Roberto et al. LTE transmission in unlicensed bands: Evaluating the impact over clear channel assessment // 2018 27th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN) / IEEE. 2018. Pp. 1–8.
71. Логинов В.А., Ляхов А.И., Хоров Е.М. Совместное существование сетей Wi-Fi и LTE- LAA: открытые проблемы // Информационные процессы. 2018. Т. 18, № 3. С. 197–209.
72. Shoch John F, Hupp Jon A. Measured performance of an Ethernet local network // Communications of the ACM. 1980. Vol. 23, no. 12. Pp. 711–721.

73. Molloy Michael K. Collision resolution on the CSMA/CD bus // Computer Networks and ISDN Systems. 1985. Vol. 9, no. 3. Pp. 209–214.
74. Lo Wing F, Mouftah Hussein T. Collision detection technique for multiple access protocols on radio channels // Computer communications. 1987. Vol. 10, no. 5. Pp. 227–233.
75. Carvalho Marcelo M, Garcia-Luna-Aceves JJ. Carrier-sense multiple access with transmission acquisition (CSMA/TA) // 2018 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops / IEEE. 2018. Pp. 1–9.
76. Rom Raphael. Collision detection in radio channels // Local area and multiple access networks. 1986. Pp. 235–249.
77. Voulgaris Konstantinos, Gkelias Athanasios, Ashraf Imran et al. Throughput analysis of wireless CSMA/CD for a finite user population // IEEE Vehicular Technology Conference /IEEE. 2006. Pp. 1–5.
78. Choi Hyun-Ho, Moon Jung-Min, Lee In-Ho, Lee Howon. Carrier sense multiple access with collision resolution // IEEE Communications Letters. 2013. Vol. 17, no. 6. Pp. 1284–1287.
79. Choi Hyun-Ho, Lee Jung-Ryun. Multi-Phased Carrier Sense Multiple Access with Collision Resolution and its Extension to Dynamic Multi-Phases // Mobile Networks and Applications. 2017. Vol. 22, no. 5. Pp. 918–930.
80. Tobagi Fouad, Kleinrock Leonard. Packet switching in radio channels: Part III-polling and (dynamic) split-channel reservation multiple access // IEEE Transactions on Communications. 1976. Vol. 24, no. 8. Pp. 832–845.
81. Tantra Juki Wirawan, Foh Chuan Heng, Tinnirello Ilenia, Bianchi Giuseppe. Out-of-band signaling scheme for high speed wireless LANs // IEEE transactions on wireless communications. 2007. Vol. 6, no. 9. Pp. 3256–3267.
82. Parikh Vishal, Kivanc-Tureli Didem, Tureli Uf. Performance analysis of CSMA and RI-BT-MA in an ad hoc network // 2008 42nd Annual Conference on Information Sciences and Systems / IEEE. 2008. Pp. 1173–1178.

83. Preetha P, Shajahan Shahanas, Lakshmi P Sethu, Jibukumar MG. High throughput MAC protocol using sequential collision resolution and outband signalling // *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 46. Pp. 1116–1125.
84. Bianchi Giuseppe. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // *IEEE Journal on selected areas in communications*. 2000. Vol. 18, no. 3. Pp. 535–547.
85. Tang Zhenzhou, Zhou Xuesheng, Hu Qian, Yu Guanding. Throughput analysis of LAA and Wi-Fi coexistence network with asynchronous channel access // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. Pp. 9218–9226.
86. Lyakhov Andrey, Pustogarov Ivan, Gudilov Andrey. Direct links in IEEE 802.11: Analytical study of unfairness problem // *Automation and Remote Control*. 2008. Vol. 69, no. 9. Pp. 1630–1645.
87. 3GPP. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures: Technical Specification (TS) 36.213: 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2017. — 03. Version 14.2.0. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2427>.
88. Куцевол П.Н., Логинов В.А., Ляхов А.И., Хоров Е.М. Математическое моделирование совместной работы беспроводных локальных сетей и сотовых сетей пятого поколения // *Автоматика и телемеханика*. 2019. № 12. С. 115–132.
89. Левицкий Илья, Куреев Алексей. Исследование эффекта захвата канала в сетях Wi-Fi // *Сборник трудов 42-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН «Информационные технологии и системы 2018»*. 2018. С. 305–319.
90. Khorov Evgeny, Kureev Aleksey, Levitsky Ilya, Lyakhov Andrey. Testbed to Study the Capture Effect: Can We Rely on This Effect in Modern Wi-Fi Networks // *2018 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom) / IEEE*. 2018. Pp. 1–5.

91. Гусак Алексей Адамович, Гусак Галина Максимовна, Бричикова Елена Алексеевна. Справочник по высшей математике. Минск: ТетраСистемс, 1999.

## ДОДАТКИ

Додаток А  
(Технічне завдання)



Додаток А  
(обов'язковий)  
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав.кафедри ІКСТ ВНТУ,  
докт. техн. наук, професор  
В.М. Кичак  
“ \_ ” \_\_\_\_\_ 2022 р.

### **ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи  
ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСАНКЦІОНОВАНОГО ДОСТУПУ ДО  
РАДІОТРАКТУ В БЕЗПРОВІДНИХ ЛОКАЛЬНИХ ТА МОБІЛЬНИХ  
МЕРЕЖАХ

08-34.МКР.004.00.000 ТЗ

Керівник роботи  
к.т.н., доцент каф. ІКСТ  
Васильківський М. В.

Виконавець: ст. гр. ТКС-21м  
Кошлай В.Д.

Вінниця-2022

## 1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету від “14” 09 2022 року № 203 та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: 01.09.2022 р.

Дата закінчення: 19.12.2022 р.

## 2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

*Метою* магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності методів випадкового доступу в стільникових мережах при спільному існуванні з бездротовими локальними мережами в загальному каналі неліцензованого частотного діапазону.

*Задачами магістерської дипломної роботи є:*

- розробка технічного завдання;
- проведення порівняльного аналізу методів доступу до неліцензованого каналу в стільникових мережах за допомогою аналітичного моделювання.
- розробка методу дозволу колізій для БССМ, що дозволяє виявляти та дозволяти колізії передач СБЛМ і БССМ, знизивши тим самим негативний вплив колізій на ефективність роботи бездротових локальних та стільникових мереж.
- розробка аналітичної моделі роботи мережі, що використовує запропонований метод дозволу колізій, яка дозволить оцінити ймовірність дозволу колізії та знайти пропускні можливості бездротової локальної та стільникової мереж.

*Об'єктом дослідження* є процеси випадкового доступу в стільникових мережах при спільному існуванні з бездротовими локальними мережами.

*Предметом дослідження* є технології та математичні моделі, що дозволять підвищити ефективність методів випадкового доступу.

*Основними завданнями роботи є:*

- порівняльний аналіз ефективності різних реалізацій методу випадкового доступу LBT до загального каналу в стільникових мережах при спільному існуванні з бездротовими локальними мережами;
- збільшення ефективності методу доступу до середовища LBT для базових станцій мережі за рахунок додавання можливості виявлення та дозволу колізій.;
- математичне моделювання запропонованих методів;
- аналіз економічної ефективності проведеної розробки;
- дослідження питань безпеки життєдіяльності.

Розроблені в ході виконання роботи технічні і програмні засоби на основі технології LTE забезпечать підвищення продуктивності телекомунікаційних радіомереж.

### 3 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МКР

Список використаних джерел розробки:

3.1 Cisco. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Up- date, 2017–2022 White Paper, 2019.

3.2 Taha Abd-Elhamid M, Ali Najah Abu, Hassanein Hossam S. LTE, LTE-advanced and WiMAX: Towards IMT-advanced Networks. John Wiley & Sons, 2011.

3.3 GSA. Progress to Gigabit LTE Networks – May Update, 2018 // Online: <https://gsacom.com/paper/progress-gigabit-lte-networks-may-update/>.

3.4 O'hara Bob, Petrick Al. IEEE 802.11 handbook: a designer's companion. IEEE Standards Association, 2005.

3.5 Perahia Eldad, Stacey Robert. Next generation wireless LANs: 802.11 n and 802.11 ac. Cambridge university press, 2013.

3.6 IEEE. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2016.

3.7 Khorov E., Kiryanov A., Lyakhov A., Bianchi G. A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs // IEEE Communications Surveys Tutorials. 2019. — Firstquarter. Vol. 21, no. 1. Pp. 197–216.

3.8 Ho Quang-Dung, Tweed Daniel, Le-Ngoc Tho. Requirements and regulations in the 5 ghz unlicensed spectrum // Long term evolution in unlicensed bands. Springer, 2017. Pp. 11–20.

3.9 Cano Cristina, Lopez-Perez David, Claussen Holger, Leith Douglas J. Using LTE in unlicensed bands: Potential benefits and coexistence issues // IEEE communications magazine. 2016. Vol. 54, no. 12. Pp. 116–123.

3.10 Labib Mina, Reed Jeffrey H, Martone Anthony F, Zaghloul Amir I. Coexistence between radar and LTE-U systems: Survey on the 5 GHz band // 2016 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM) / IEEE. 2016. Pp. 1–2.

3.11 Xia Pengfei, Teng Zi, Wu Jun. How loud to talk and how hard to listen-before-talk in unlicensed LTE // 2015 IEEE international conference on communication workshop (ICCW) / IEEE. 2015. Pp. 2314–2319.

3.12 Положення про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти у Вінницькому національному технічному університеті / Уклад. А. О. Семенов, Л. П. Громова, Т.В. Макарова, Сердюк О.В. – Вінниця: ВНТУ, 2021 – 60 с.

3.13 Кухарчук В.В., Ігнатенко О.Г., Обертюх Р.Р. Методичні вказівки до оформлення дипломних проектів (робіт) для студентів всіх спеціальностей.- В.: ВДТУ, 2002.

3.14 Козловський В.О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник. – В.: ВДТУ, 2003.

3.15 ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація, звіти у сфері науки і техніки.- К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016.

3.16 Бортник Г.Г., Васильківський М.В. Методичні вказівки до підготовки магістерських кваліфікаційних робіт для студентів спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка» усіх форм навчання.- Вінниця:ВНТУ, 2018.- 50 с.

#### 4 ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра інфокомунікаційних систем і технологій, студент групи ТКС-21м Кошлай В.Д.

#### 5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Пропонується виконати дослідження способів підвищення продуктивності методів випадкового доступу до загального неліцензованому каналу в бездротових локальних та стільникових мережах.

Технічні вимоги, яким повинна відповідати робота, наступні:

- тип системи передавання – 4G, 5G, Wi-Fi;
- кількість каналів передачі BSSM LTE – 4;
- ширина пропускання BSSM LTE – 80МГц;
- діапазон частот Wi-Fi – 2,45ГГц і 5ГГц;
- діапазон неліцензованої смуги частот – 400МГц.

## 6 ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
		початок	закінчення		
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2022р.	07.09.2022р.	Вибрана тема МКР	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2022р.	13.09.2022р.	Проведений аналіз	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка завдання на МКР.	14.09.2022р.	27.09.2022р.	Розроблено завдання	Додаток А
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі.	28.09.2022р.	10.10.2022р.	Постановка питання	Вступ. Розділ 1.
5.	Математичне моделювання.	11.10.2022р.	13.11.2022р.	Створені математичні моделі	Розділи 2-4
6.	Аналіз економічної ефективності	14.11.2022р.	20.11.2022р.	Економічна частина МКР	Розділ 5
7.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	21.11.2022р.	25.11.2022р.	Частина ОТ та БНС	Розділ 6
8.	Оформлення пояснювальної записки (ПЗ) та графічної частини	26.11.2022р.	01.12.2022р.	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
9.	Нормоконтроль, попередній захист, опонування МКР	02.12. 2022р.	09.12.2022р.	Позитивні відгуки	Відгуки
10.	Захист МКР ЕК		19.12.2022р.	Позитивний захист	Протокол ЕК

## 7 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи будуть розроблені:

- схема базового сценарію;
- схема сценарію спільного існування;

- аналітична модель мережі, що використовує метод доступу до загального каналу з використанням резервуючого сигналу;
- графік приросту сумарної пропускної спроможності мереж при використанні методу доступу до загального каналу з використанням резервуючого сигналу;
- аналітична модель мережі, що використовує метод доступу до загального каналу без використання резервуючого сигналу;
- графік приросту сумарної пропускної спроможності мережі при використанні методу доступу до загального каналу без використання резервуючого сигналу;
- метод дозволу колізій для базових станцій;
- аналітична модель мережі, що використовує метод дозволу колізій для базових станцій;
- графік приросту пропускної спроможності стільникової мережі у разі використання методу дозволу колізій;
- економічна частина МКР;
- розділ ОП та БНС.

Результати, отримані в процесі виконання даної роботи, можуть бути впроваджені в галузі телекомунікацій:

- Регіональний Центр експлуатації телекомунікаційної мережі України шляхом впровадження широкосмугового ІКМ;
- ПАТ “Укртелеком” шляхом впровадження нових методик контролю характеристик ІКМ.

Очікуваний техніко-економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень очікується підвищення ефективності методів випадкового доступу до загального неліцензованому каналу в бездротових локальних та стільникових мережах.

## 8 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

За результатами виконання МКР до ЕК подаються пояснювальна записка, графічна частина МКР, відзив і рецензія.

## 9 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ЇЇ ЕТАПІВ

Поетапно результати виконання МКР розглядаються керівником роботи та обговорюються на засіданні кафедри.

Захист магістерської кваліфікаційної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

## 10 ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання досліджень повинна містити:

- схему базового сценарію;
- схему сценарію спільного існування;
- аналітичну модель мережі, що використовує метод доступу до загального каналу з використанням резервуючого сигналу;
- графік приросту сумарної пропускної спроможності мереж при використанні методу доступу до загального каналу з використанням резервуючого сигналу;
- аналітичну модель мережі, що використовує метод доступу до загального каналу без використання резервуючого сигналу;
- графік приросту сумарної пропускної спроможності мережі при використанні методу доступу до загального каналу без використанням резервуючого сигналу;
- метод дозволу колізій для базових станцій;
- аналітичну модель мережі, що використовує метод дозволу колізій для базових станцій;



- графік приросту пропускної спроможності стільникової мережі у разі використання методу дозволу колізій;
- економічну частину та розділ БЖД і ЦЗ.

## 11 ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

Додаток Б  
(обов'язковий)

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових  
запозичень

ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

і роботи: Дослідження несанкціонованого доступу до радіотракту в  
овідних локальних та мобільних мережа

юботи: Магістерська кваліфікаційна робота  
(БДР, МКР)

зділ кафедра інфокомунікаційних систем і технологій, факультет  
маційних електронних систем  
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unichesk

інальність 100 % Схожість 0 %

з звіту подібності (відмітити потрібне):

- 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість кає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. у направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або і містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування ровісних запозичень.

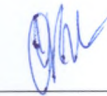
а відповідальна за перевірку

  
(підпис)

Васильківський М.В.  
(прізвище, ініціали)

ійомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unichesk щодо ти.

р роботи

  
(підпис)

Кошлай В.Д.  
(прізвище, ініціали)

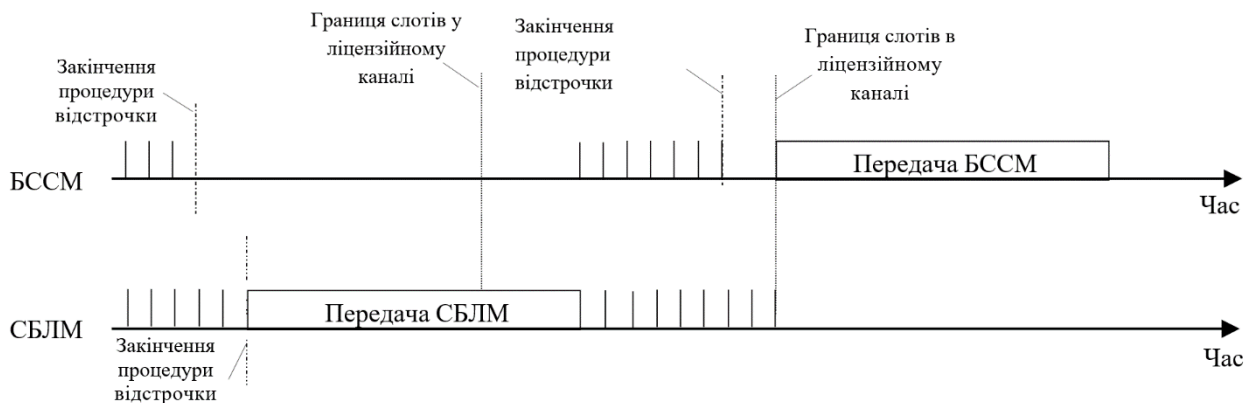
вник роботи

  
(підпис)

Васильківський М.В.  
(прізвище, ініціали)

Додаток В  
(обов'язковий)

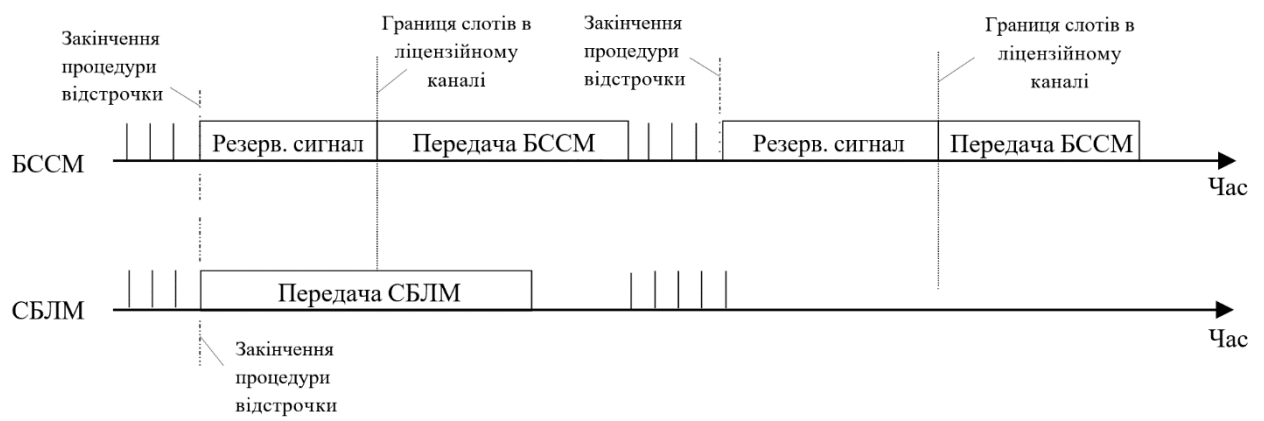
Приклад роботи реалізації методу доступу LBT без резервуючого сигналу



					08-34.МКР.004.00.001 Е8		
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Кошлай В.Д.			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.				1	1
Реценз.					ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.					
Затверд.		Кичак В.М.					
Приклад роботи реалізації методу доступу LBT без резервуючого сигналу							

Додаток Г  
(обов'язковий)

Приклад реалізації методу доступу LBT з резервуючим сигналом

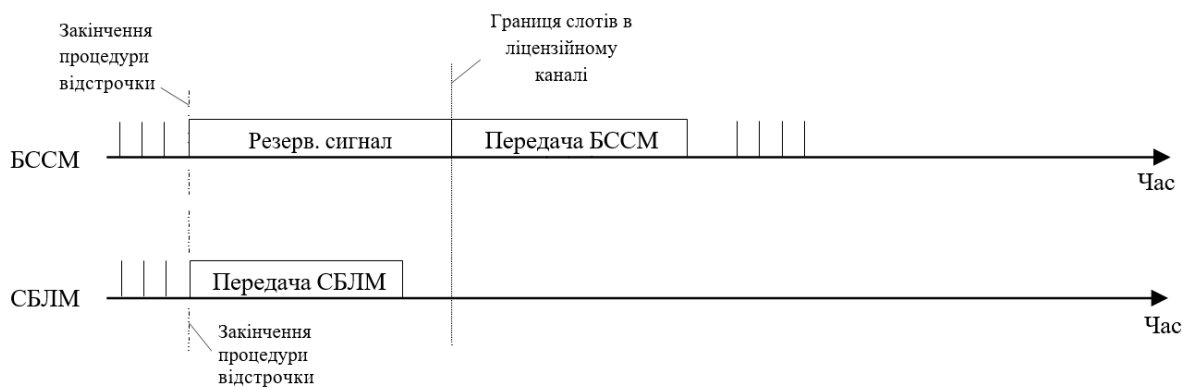


					08-34.МКР.004.00.001 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Приклад реалізації методу доступу LBT з резервуючим сигналом	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Кошлай В.Д.					1	1
Перевір.		Васильківський М.В.				ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Реценз.								
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						

Додаток Д  
(обов'язковий)

Приклад асиметричної колізії при використанні реалізації методу LBT з  
резервуючим сигналом

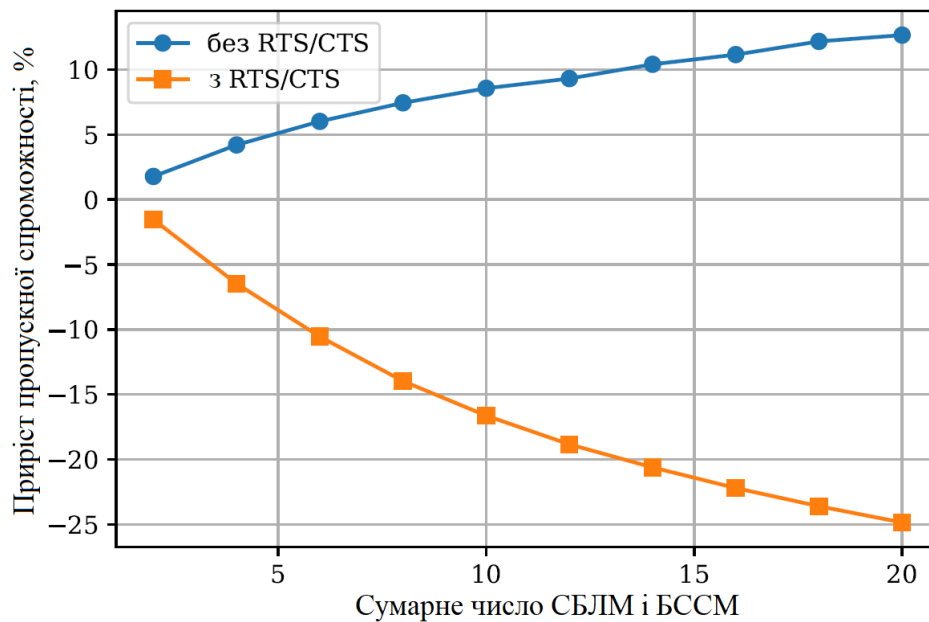




					08-34.МКР.004.00.001 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Кошлай В.Д.			Приклад асиметричної колізії при використанні реалізації методу LBT з резервуючим сигналом	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.						ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						

Додаток Е  
(обов'язковий)

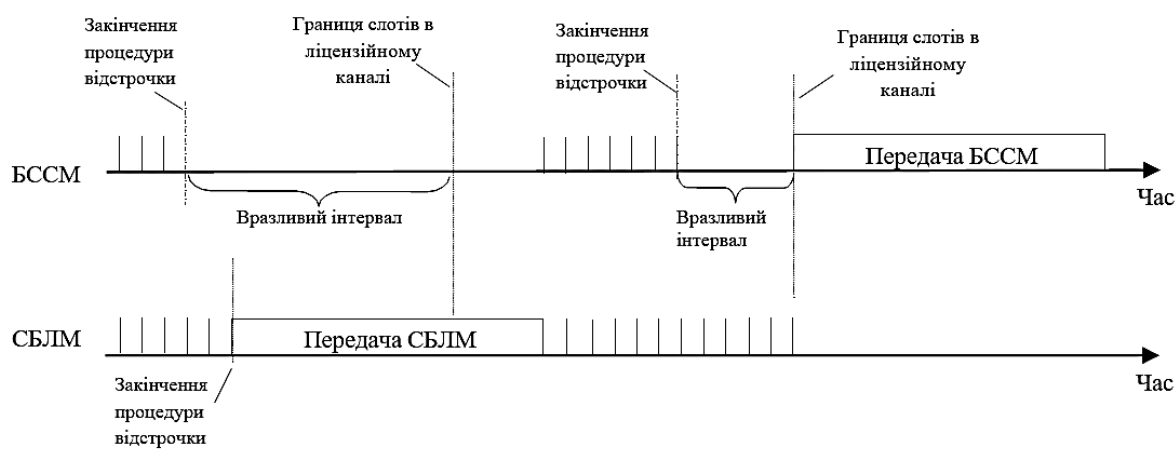
Приріст сумарної пропускної спроможності обох мереж при використанні методу доступу до загального каналу з використанням резервуючого сигналу і рівній кількості СБЛМ та БССМ



					08-34.МКР.004.00.001 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Кошлай В.Д.			Приріст сумарної пропускної спроможності обох мереж при використанні методу доступу до загального каналу з використанням резервуючого сигналу і рівній кількості СБЛМ та БССМ	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.						ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						

Додаток Є  
(обов'язковий)

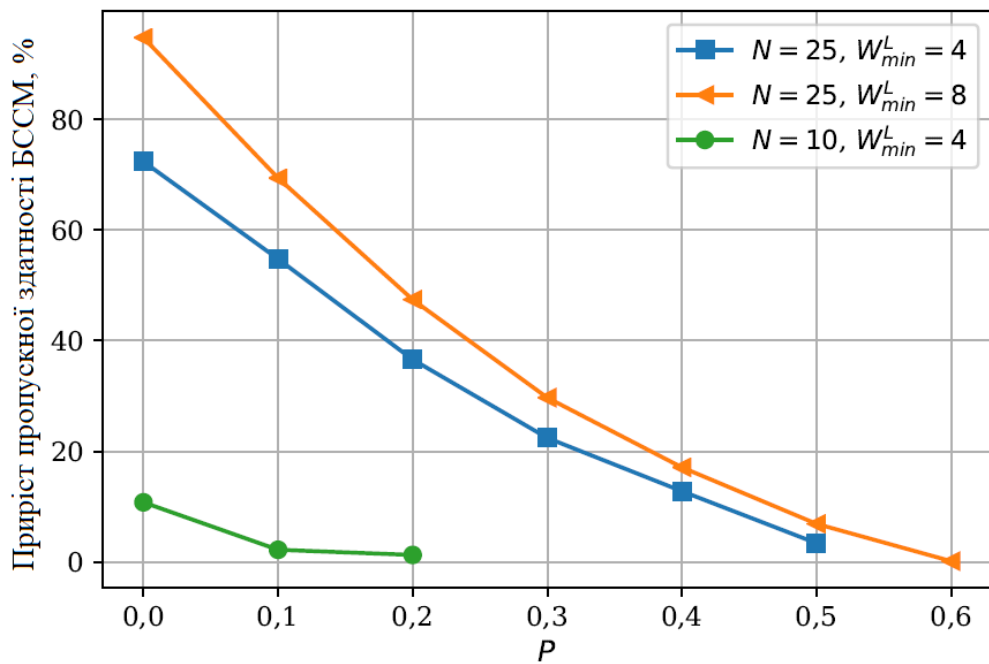
Вразливий інтервал при використанні реалізації механізму LBT без  
резервуючого сигналу



					08-34.МКР.004.00.001 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Кошлай В.Д.			Вразливий інтервал при використанні реалізації механізму LBT без резервуючого сигналу	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.						ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						

Додаток Ж  
(обов'язковий)

Максимальний приріст пропускної спроможності БССМ при використанні  
методу доступу до загального каналу без використання резервуючого  
сигналу

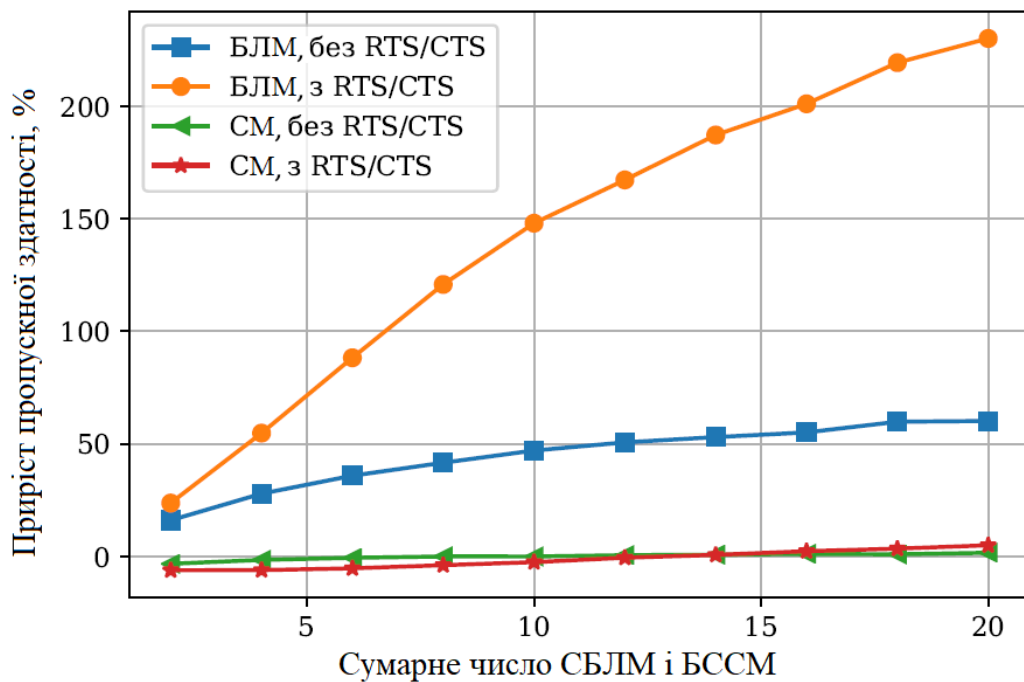


					08-34.МКР.004.00.001 Е8					
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Максимальний приріст пропускної спроможності БССМ при використанні методу доступу до загального каналу без використання резервуючого сигналу			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.	Кошлай В.Д.								1	1
Перевір.	Васильківський М.В.							ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Реценз.										
Н. Контр.	Васильківський М.В.									
Затверд.	Кичак В.М.									

Додаток З  
(обов'язковий)

Приріст пропускної спроможності, отриманий під час використання МДК  
порівняно з базовим підходом у сценарії 1

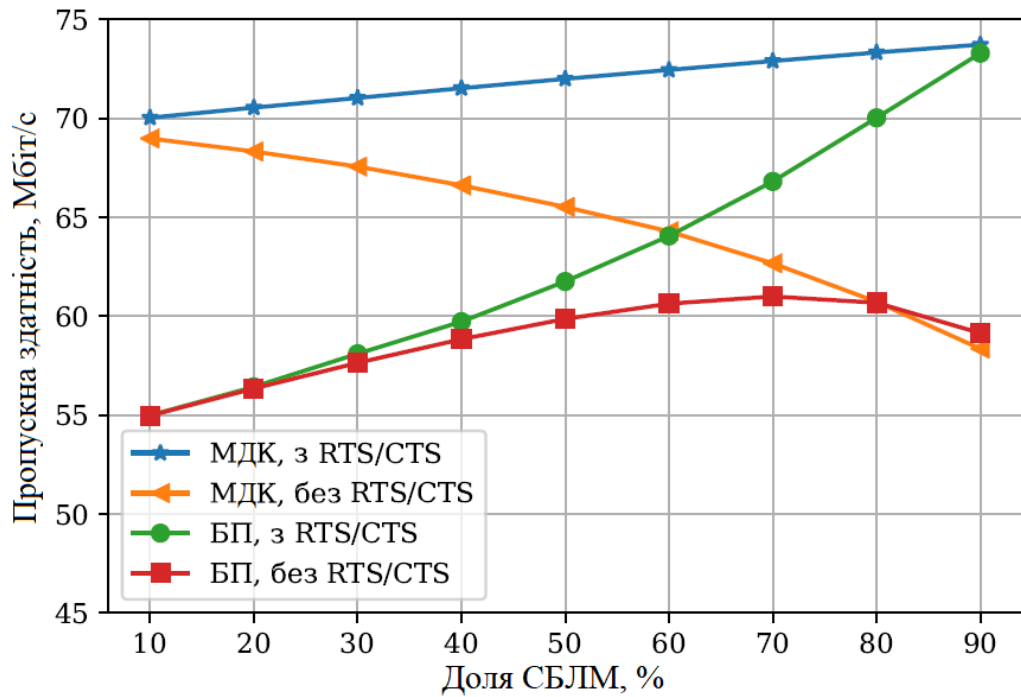




					08-34.МКР.004.00.001 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Кошлай В.Д.			Приріст пропускної спроможності, отриманий під час використання МДК порівняно з базовим підходом у сценарії 1	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.						ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						

Додаток И  
(обов'язковий)

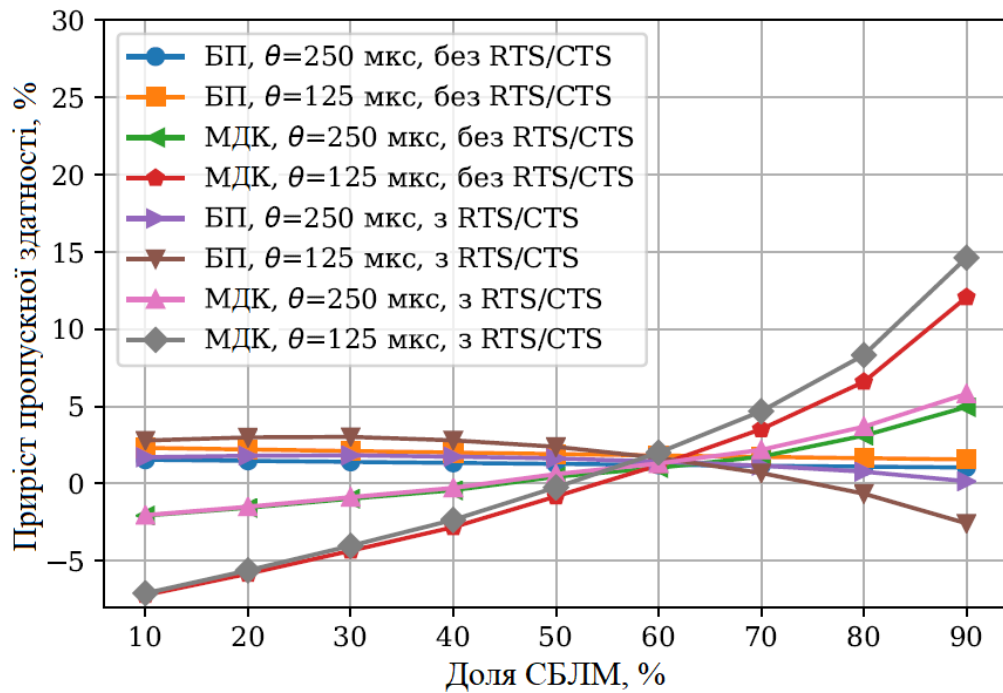
Сумарна пропускна здатність обох мереж у сценарії 2



					08-34.МКР.004.00.001 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Кошлай В.Д.			Сумарна пропускна здатність обох мереж у сценарії 2	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.						ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						

Додаток І  
(обов'язковий)

Приріст пропускної спроможності стільникової мережі у сценарії 3



					08-34.МКР.004.00.001 Е8					
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Приріст пропускної спроможності стільникової мережі у сценарії 3			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Кошлай В.Д.							1	1
Перевір.		Васильківський М.В.						ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Реценз.										
Н. Контр.		Васильківський М.В.								
Затверд.		Кичак В.М.								