

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем 6 покоління»

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

Топольський О.С.

Керівник: д.т.н., професор каф. ІКСТ

Кичак В.М.  
« 16 » 12 2024 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС

Семенов А.О.  
« 16 » 12 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

Кичак В.М.  
« 16 » 12 2024 р.

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних електронних систем  
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій  
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
Галузь знань - 17– Електроніка, автоматизація та електронні комунікації  
(шифр і назва)  
Спеціальність - 172 – Електронні комунікації та радіотехніка  
(шифр і назва)  
Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак  
"24" 09 2024 року

## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Топольському Олександру Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем 6 покоління

керівник роботи Кичак Василь Мартинович, докт. техн. наук, професор  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "17" 09 2024 року № 310

2. Строк подання студентом роботи 09 грудня 2024 року

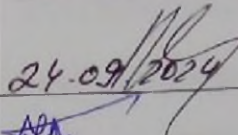
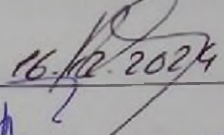
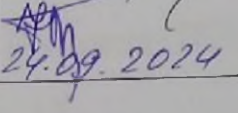
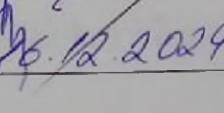
3. Вихідні дані до роботи тип дуплексного передання – TDD; несуча частота – 4 ГГц; смуга частот - 100 МГц; модуляція сигнальної хвилі - DFT-s-OFDM; відстань між піднесучими - 30 кГц; параметри кодування та модуляції – QPSK, MCS3; ресурсна алокація - TBoMS або схема повторення передачі; антенна конфігурація UE - 1 передавальний елемент; антенна конфігурація BS; модель каналу - TDL-C; середня затримка поширення - 300 нс; швидкість UE - 3 км/год; кількість символів DM-RS – 2; алгоритм оцінювання каналу – MMSE; метрика продуктивності - 10% BLER.

4. Зміст текстової частини: системи мобільного широкосмугового зв'язку шостого покоління; покращення методів енергозбереження користувацького обладнання для мобільних систем зв'язку 5G NR; підвищення завадостійкості систем зв'язку 5G NR; метод адаптації до нелінійних спотворень переданих сигналів у системах зв'язку шостого покоління; економічне обґрунтування доцільності реалізації науково-дослідної роботи

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) схема розгортання неавтономних мереж 5G; структура мережі мобільного стільникового зв'язку; матриця LDPC зі стандарту NR; алгоритм обчислення початкового біта в циклічному буфері для n-го слоту TBoMS передачі;

узагальнена структурна схема передавача; гістограми модульованих сигналів до (а) і після (б) застосування двовимірної гаусівської фільтрації.

#### 6. Консультанти розділів роботи

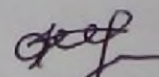
| Розділ             | Прізвище, ініціали та посада консультанта      | Підпис, дата                                                                                     |                                                                                                   |
|--------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |                                                | завдання видав                                                                                   | завдання прийняв                                                                                  |
| Спеціальна частина | Кичак В.М.,<br>професор кафедри ІКСТ           | <br>24.09.2024 | <br>16.12.2024 |
| Економічна частина | Буреннікова Н.В.<br>д.е.н., професор каф. ЕПВМ | <br>24.09.2024 | <br>16.12.2024 |

7. Дата видачі завдання 02 вересня 2024 року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

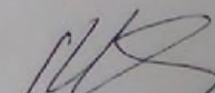
| № з/п | Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи                                                 | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1.    | Розробка технічного завдання                                                                      | 09.09.2024р.                  |          |
| 2.    | Системи мобільного широкосмугового зв'язку шостого покоління                                      | 16.09.2024р.                  |          |
| 3.    | Покращення методів енергозбереження користувацького обладнання для мобільних систем зв'язку 5G NR | 12.10.2024р.                  |          |
| 4.    | Підвищення завадостійкості систем зв'язку 5G NR                                                   | 30.10.2024р.                  |          |
| 5.    | Метод адаптації до нелінійних спотворень переданих сигналів у системах зв'язку шостого покоління  | 11.11.2024р.                  |          |
| 6.    | Аналіз економічної ефективності розробки                                                          | 22.11.2024р.                  |          |
| 7.    | Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини                                         | 02.12.2024р.                  |          |
| 8.    | Нормоконтроль МКР                                                                                 | 06.12.2024р.                  |          |
| 9.    | Попередній захист МКР, опонування МКР                                                             | 14.12.2024р.                  |          |
| 10.   | Захист МКР ЕК                                                                                     | 18.12.2024р.                  |          |

Студент

  
(підпис)

Топольський О.С.

Керівник роботи

  
(підпис)

Кичак В.М.

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Топольський О.С. Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем 6 покоління. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – електронні комунікації та радіотехніка, освітня програма – телекомунікаційні системи та мережі. Вінниця: ВНТУ, 2024. 112 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 24 назв; рис.: 37; табл. 12.

У магістерській кваліфікаційній роботі запропоновано методи й алгоритми підвищення енергоефективності та завадостійкості (зниження ймовірності пакетних помилок) у системах мобільного зв'язку шостого покоління.

Запропоновано методи, що використовують спеціалізовані сигнали пробудження та переходу в режим сну для поліпшення енергозбереження призначеного для користувача обладнання в системах зв'язку 5G. Проведено імітаційне моделювання для оцінки ефективності запропонованих алгоритмів. Аналіз показав, що адаптація схеми переривчастого приймання до трафіку дає значний виграш в енергозбереженні до 70% для моделей трафіку обміну миттєвими повідомленнями та перегляду веб-сторінок. Використання сигналу переходу в режим сну призводить до стабільного зниження середнього споживання енергії до 60% та 50% для випадків із середнім та високим завантаженням частотно-часових ресурсів, відповідно.

Запропоновані методи енергозбереження було рекомендовано до використання в системах зв'язку 5G та впроваджено до стандарту починаючи з NR Release-17 та NR Release-18. Запропоновано нову схему для зниження порога завадостійкості в системах NR 5G. Розроблено спеціалізований алгоритм для нового типу мультислотового передавання даних. Запропоновано спеціалізований шаблон для поліпшення оцінювання каналу за рахунок

спільного міжслотового оброблення. Аналіз показав, що поліпшена схема перебудови частоти між слотами дає додаткове зниження порога завадостійкості на 0,5 дБ та виграш у зниженні порога до 1 дБ.

Запропоновану схему рекомендовано до використання в системах 5G та впроваджено до стандарту NR Release-18. Розроблено метод боротьби з нелінійними спотвореннями на передавачі. Моделювання показало, що самонавчальний алгоритм демонструє хорошу компенсацію для дисбалансу I/Q компонент. Розроблений алгоритм є менш складним і може бути використаний в мережах Інтернету речей та в пристроях наступних поколінь бездротового зв'язку.

## ABSTRACT

UDC 621.396

Topolskyi O.S. Methods of improving energy efficiency and noise immunity of 6th generation mobile systems. Master's qualification work in specialty 172 - electronic communications and radio engineering, educational program - telecommunication systems and networks. Vinnytsia: VNTU, 2024. 112 c.

In Ukrainian. Bibliography: 24 titles; Figures: 37; Table 12.

The master's thesis proposes methods and algorithms for improving energy efficiency and noise immunity (reducing the probability of packet errors) in sixth-generation mobile communication systems.

Methods are proposed that use specialized wake-up and sleep signals to improve the energy efficiency of user equipment in 5G communication systems. Simulation modeling was performed to evaluate the effectiveness of the proposed algorithms. The analysis showed that adapting the intermittent reception scheme to the traffic gives a significant gain in energy saving of up to 70% for instant messaging and web browsing traffic models. The use of the sleep signal leads to a steady decrease in average energy consumption of up to 60% and 50% for cases with medium and high utilization of time and frequency resources, respectively.

The proposed energy saving methods have been recommended for use in 5G communication systems and implemented in the standard starting with NR Release-17 and NR Release-18. A new scheme to reduce the interference threshold in NR 5G systems is proposed. A specialized algorithm for a new type of multislot data transmission was developed. A specialized template is proposed to improve channel estimation through joint inter-slot processing. The analysis showed that the improved scheme of frequency reconstruction between slots gives an additional reduction in the noise immunity threshold by 0.5 dB and a gain in reducing the threshold to 1 dB.

The proposed scheme is recommended for use in 5G systems and implemented in the NR Release-18 standard. A method for combating nonlinear distortion at the transmitter has been developed. Simulations have shown that the self-learning algorithm demonstrates good compensation for the I/Q component imbalance. The developed algorithm is less complicated and can be used in the Internet of Things networks and in the next generations of wireless communication devices.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....                                                                                          | 8  |
| ВСТУП.....                                                                                                      | 10 |
| 1 СИСТЕМИ МОБІЛЬНОГО ШИРОКОСМУГОВОГО ЗВ'ЯЗКУ<br>ШОСТОГО ПОКОЛІННЯ.....                                          | 14 |
| 1.1 Сценарії використання систем зв'язку 5G .....                                                               | 14 |
| 1.2 Неавтономні мережі 5G .....                                                                                 | 16 |
| 1.3 Енергоефективність абонентського обладнання в мережах 5G .....                                              | 17 |
| 1.4 Висновки до розділу 1 .....                                                                                 | 19 |
| 2 ПОКРАЩЕННЯ МЕТОДІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ<br>КОРИСТУВАЦЬКОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ<br>ЗВ'ЯЗКУ 5G NR.....  | 21 |
| 2.1 Опис системної моделі .....                                                                                 | 21 |
| 2.1.1 Сценарії моделювання бездротових мобільних систем зв'язку на<br>системному рівні .....                    | 22 |
| 2.1.2 Моделі трафіку мобільних систем зв'язку .....                                                             | 23 |
| 2.2 Методи підвищення енергозбереження абонентського обладнання<br>для 5G .....                                 | 26 |
| 2.3 Результати комп'ютерного моделювання .....                                                                  | 32 |
| 2.4 Висновки до розділу 2 .....                                                                                 | 53 |
| 3 ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ 5G NR.....                                                          | 55 |
| 3.1 Методи зниження порога завадостійкості мобільних систем зв'язку 5G.....                                     | 55 |
| 3.2 3GPP моделі каналу зв'язку для моделювання бездротових мобільних<br>систем зв'язку на фізичному рівні ..... | 65 |
| 3.3 Результати комп'ютерного моделювання .....                                                                  | 66 |
| 3.4 Висновки до розділу 3 .....                                                                                 | 70 |
| 4 МЕТОД АДАПТАЦІЇ ДО НЕЛІНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ ПЕРЕДАНИХ<br>СИГНАЛІВ У СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ ШОСТОГО ПОКОЛІННЯ .....     | 72 |
| 4.1 Опис системної моделі .....                                                                                 | 72 |

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2 Загальний підхід до компенсації спотворень передавача на стороні<br>приймача.....         | 76  |
| 4.3 Результати комп'ютерного моделювання .....                                                | 78  |
| 4.4 Висновки до розділу 4 .....                                                               | 81  |
| 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....                                                                     | 82  |
| 5.1 Оцінювання наукового ефекту.....                                                          | 82  |
| 5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....                             | 85  |
| 5.2.1 Витрати на оплату праці.....                                                            | 86  |
| 5.2.2 Відрахування на соціальні заходи .....                                                  | 90  |
| 5.2.3 Сировина та матеріали.....                                                              | 90  |
| 5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....                                                  | 92  |
| 5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт .....                           | 92  |
| 5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт .....                     | 92  |
| 5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень .....                           | 93  |
| 5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей .....                                    | 95  |
| 5.2.9 Службові відрядження.....                                                               | 96  |
| 5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і<br>організації..... | 96  |
| 5.2.11 Інші витрати.....                                                                      | 97  |
| 5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....                                              | 97  |
| 5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної<br>роботи .....            | 99  |
| 5.4 Висновок до розділу 5.....                                                                | 100 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                 | 101 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                                              | 104 |
| Додаток А Ілюстративна частина .....                                                          | 107 |
| Додаток Б Протокол перевірки магістерської кваліфікаційної роботи .....                       | 111 |

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AR - доповнена реальність

BLER - імовірність блокової помилки

BPF – смуговий фільтр

BS – базова станція

CE – контрольний елемент

CRC - послідовність циклічного надлишкового коду

DCI - низхідна лінія зв'язку

DSP – цифровий сигнальний процесор

DRX – схема приймання з паузами

eMBB - покращений мобільний широкосмуговий зв'язок

HARQ - гібридна схема повторного передавання з автоматичним запитом

ICI - рівень міжстільникової інтерференції

IM – миттєві повідомлення

IoT - інтернет речей

LDPC - завадостійке кодування з використанням кодів з малою щільністю перевірки на парність

LO – опорний генератор

MCE - Міжнародний союз електрозв'язку

mMTC - масові комунікації машинного типу

PA – підсилювач потужності

PRB - блок частотно-часових ресурсів

SCS – відстань між підносійними частотами

SP - тривалість періоду мовчання

SSB – блок сигналів синхронізації

TBS - розмір переданого блоку даних

TS - мовний потік

VAF - коефіцієнт голосової активності

VR - віртуальна реальність

UE – обладнання користувача

UMi – відкрита місцевість

URLLC - наднадійний зв'язок із низькою затримкою

WUS – сигнал пробудження

НДР – Науково-дослідна робота

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Протягом останніх трьох десятиліть бездротовий мобільний зв'язок пройшов шлях від систем досить громіздкої аналогової телефонії до сучасної високорозвиненої загальнодоступної комунікаційної платформи.

Впровадження нових поколінь мобільних систем зв'язку, починаючи з 2G і закінчуючи четвертим поколінням 4G Long-Term Evolution (LTE), значно змінило спосіб життя людини завдяки високій швидкості та відносно малій затримці передавання даних. ITU-R (МСЕ-Р, Сектор радіозв'язку Міжнародного Союзу Електрозв'язку) у звіті [1] 2017 року опублікував список вимог до систем мобільного зв'язку 2020 року і наступних років (International Mobile Telecommunications-2020, IMT-2020). Стандарт LTE (Long Term Evolution) систем мобільного зв'язку четвертого покоління (4G) не здатний виконати вищі вимоги до пропускної спроможності, часу затримки передавання даних і стабільності підключення до мережі, які висувають до майбутніх систем мобільного зв'язку [1]. Порівняно з 4G, системи зв'язку шостого покоління (5G) стандарту New Radio (NR) повинні забезпечувати набагато вищу швидкість і надмалу затримку передавання даних завдяки використанню більшої кількості високочастотних діапазонів і передових мережевих технологій. Порівняно зі стандартом LTE стандарт NR покликаний забезпечити у двадцять разів вищу пікову швидкість передавання даних і в 10 разів меншу часову затримку [2, 3]. У результаті, в мережах зв'язку шостого покоління буде реалізовано більш надійне передавання даних за більш високої щільності користувачів.

Для забезпечення високошвидкісного передавання даних у мережах 5G потрібне розширення частотних діапазонів, що, однак, є основною причиною збільшеного споживання енергії як для користувацького обладнання, так і для базових станцій у системах зв'язку шостого покоління. Частотні діапазони, що використовуються для систем зв'язку нового стандарту 5G, можна розділити на три категорії: низькочастотні, середньочастотні та високочастотні.

Низькочастотний діапазон розташований нижче 1 ГГц (аналогічний діапазону LTE). Середньочастотний діапазон, від 1 ГГц до 6 ГГц, на відміну від низькочастотного і високочастотного діапазонів, забезпечує баланс між охопленням (величиною зони покриття) системи зв'язку та її пропускною спроможністю. Високочастотний діапазон міліметрових довжин хвиль (mmWave) розташований вище 24 ГГц і забезпечує найвищі швидкості передавання даних і величезну пропускну здатність усієї системи загалом, завдяки великій смузі частотних каналів, які використовуються, але має значно менші зони покриття через більше загасання сигналів на високій несучій частоті під час розповсюдження у вільному просторі.

*Аналіз останніх досліджень.* Серед робіт вітчизняних і зарубіжних авторів, присвячених системам бездротового мобільного зв'язку шостого покоління, можна відзначити роботи М. Agiwal, Е. Dahlman, В. Mondal та інших авторів [4].

Роботи зазначених авторів зробили вагомий внесок у розробку сучасних систем радіозв'язку, зокрема мереж зв'язку шостого покоління 5G.

Однак досі не було досліджено нових підходів і методів підвищення енергоефективності та завадостійкості систем бездротового мобільного зв'язку 5G. Вимога до енергоефективності систем 5G NR на два порядки вища, ніж для систем зв'язку 4G LTE. Також, як описано вище, використання більш високої несучої частоти вимагає розроблення методів передавання, що забезпечують рівень завадостійкості, як у системах 4G, за використання наявного функціоналу систем зв'язку 5G NR Release 17 [5].

*Мета і завдання роботи.* Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка та дослідження методів зниження енергоспоживання та ймовірності пакетних помилок у системах бездротового мобільного зв'язку шостого покоління.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

1. Підвищення енергоефективності користувацького обладнання в системах зв'язку 5G.

2. Зниження порогу завадостійкості для систем зв'язку 5G під час передавання даних базової станції від користувацького обладнання на краю комірки стільникового зв'язку.

3. Компенсація нелінійних спотворень передавача користувацького обладнання, що працює в режимі енергозбереження (у нелінійному режимі), шляхом додаткового оброблення сигналу на приймачі базової станції.

*Об'єктом дослідження є системи мобільного широкосмугового зв'язку шостого покоління.*

*Предметом дослідження є розробка методів зниження енергоспоживання та ймовірності пакетних помилок у системах бездротового мобільного зв'язку шостого покоління.*

*Методи досліджень базуються на використанні: методів статистичної радіофізики, теорії інформації, вищої алгебри, а також методів математичного та комп'ютерного імітаційного моделювання.*

*Новизна одержаних результатів:*

1. Запропоновано методи адаптації схеми переривчастого приймання для поліпшення енергозбереження користувацького обладнання в системах зв'язку 5G, які використовують спеціалізовані сигнали «пробудження» користувацького обладнання та переходу в «режим сну». Проведено аналіз на системному рівні енергоефективності запропонованих алгоритмів для різних моделей трафіку і ключових сценаріїв використання систем бездротового мобільного зв'язку 5G.

2. Запропоновано нову схему мультислотового передавання даних висхідним каналом зв'язку для зниження порогу завадостійкості систем зв'язку шостого покоління стандарту NR. Запропоновано спеціалізований алгоритм вибору біт для операції узгодження швидкості кодування. Проведено аналіз на фізичному рівні виграшу в зниженні ймовірності пакетних помилок запропонованого алгоритму і порівняння зі стандартною схемою повторення передачі. Також, запропоновано спеціалізований шаблон міжслотового перемикавання частоти з об'єднанням опорних сигналів демодуляції для поліпшення якості оцінювання каналу шляхом спільного міжслотового

опрацювання та здійснено аналіз його ефективності в зниженні порога завадостійкості систем зв'язку 5G.

3. Розроблено метод боротьби на стороні приймача з нелінійними спотвореннями, викликаними на передавачі. Проведено аналіз ефективності запропонованого алгоритму на прикладі боротьби зі спотвореннями в підсилювачі потужності та дисбалансом синфазної та квадратурної компонент у модуляторі передавача.

*Апробація роботи* та її основні результати роботи проводилися на Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)» у 2024 році.

Публікації результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні положення кваліфікаційної роботи висвітлені у 2 тезах науково-технічної конференції.

# 1 СИСТЕМИ МОБІЛЬНОГО ШИРОКОСМУГОВОГО ЗВ'ЯЗКУ ШОСТОГО ПОКОЛІННЯ

## 1.1 Сценарії використання систем зв'язку 5G

Порівняно зі стандартом зв'язку LTE, який здебільшого орієнтований на надання таких послуг, як голосовий зв'язок (Voice over LTE, VoLTE) або мобільний широкосмуговий зв'язок (Mobile Broadband, MBW), стандарт 5G NR надасть не лише просунутіші варіанти існуючих технологій, що зможуть забезпечити значно вищі швидкості передавання даних та меншу затримку, а й нові варіанти сервісів, що відкривають нові можливості для користувачів.

Міжнародний союз електрозв'язку (МСЕ, ІТУ) у рамках розробленої концепції систем зв'язку IMT-2020/5G визначив три основні варіанти їх використання [4]:

1. Покращений мобільний широкосмуговий зв'язок (enhanced Mobile Broadband, eMBW) усередині та поза приміщеннями.
2. Масові комунікації машинного типу (massive Machine Type Communications, mMTC), включно з Інтернетом речей (Internet of Things, IoT), «розумним» сільським господарством, «розумними» містами і «розумним» будинком.
3. Наднадійний зв'язок із низькою затримкою (Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC), призначений для автономних транспортних засобів, промислової автоматизації та роботизації.

Як показано на рисунку 1.1, сервіс eMBW фокусується на послугах із високою швидкістю передавання даних, як-от відео надвисокої чіткості (UHD-відео) або віртуальна реальність (VR), доповнена реальність (AR), тоді як URLLC фокусується на чутливих до затримки або критично важливих послугах, як-от автономні транспортні засоби або віддалена хірургія, а mMTC забезпечуватиме послуги зв'язку з дуже високою щільністю під'єднання

користувачького обладнання, як-от «розумне місто» або масовий інтернет речей (Internet of Things, IoT).

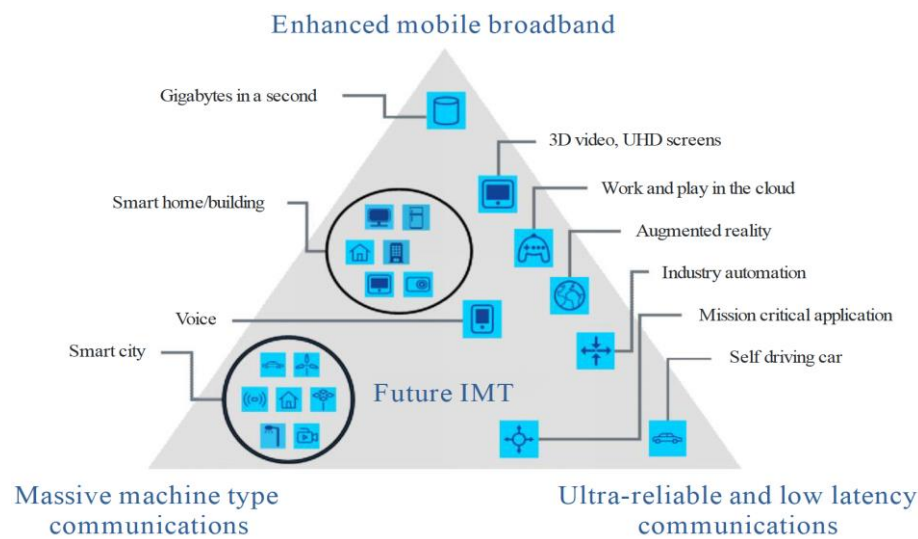


Рисунок 1.1 – Сценарії використання систем зв'язку 5G

На основі цих трьох базових варіантів систем зв'язку шостого покоління може бути створено безліч інших вузькоспеціалізованих варіантів комплексних рішень для задоволення нових потреб мобільної індустрії, що швидко розвивається. Розширення послуг зв'язку, викликане впровадженням технологій 5G, дає змогу новим категоріям пристроїв, які раніше не мали мобільного зв'язку, брати участь у глобальній комунікаційній екосистемі.

Таким чином, новий стандарт NR систем зв'язку шостого покоління 5G - це уніфіковане рішення, спрямоване на задоволення багатьох, інколи суперечливих вимог до продуктивності системи та загальної якості послуг, для яких NR забезпечує безперебійний бездротовий зв'язок і, таким чином, забезпечує функціонування всього, що пов'язане бездротовою мережею. З цієї причини, нове покоління систем бездротового зв'язку 5G повинно забезпечувати підключення і доступ до інформації, де б і коли б не знаходився користувач.

## 1.2 Неавтономні мережі 5G

Первісне впровадження інфраструктури стільникового зв'язку 5G NR зосереджене на покращеному мобільному широкосмуговому зв'язку (eMBB) для забезпечення підвищеної пропускної спроможності передачі даних і надійності з'єднання в двох нових діапазонах радіочастот: середньочастотному (від 1 до 6 ГГц) і високочастотному (вище 24 ГГц). Мережі зв'язку 5G NR у першій хвилі розгортання класифікуються як неавтономні (Non-Standalone, NSA), що означає, що мережі 5G підтримуються наявною інфраструктурою мереж 4G, як показано на рисунку 1.2. У таких Non-Standalone системах призначені для користувача пристрої з підтримкою мереж шостого покоління працюють у смузі частот 5G для підвищення пропускної спроможності передавання даних, але, як і раніше, використовують 4G для завдань, не пов'язаних з передаванням даних, наприклад, таких як зв'язок з вишками стільникового зв'язку і серверами.

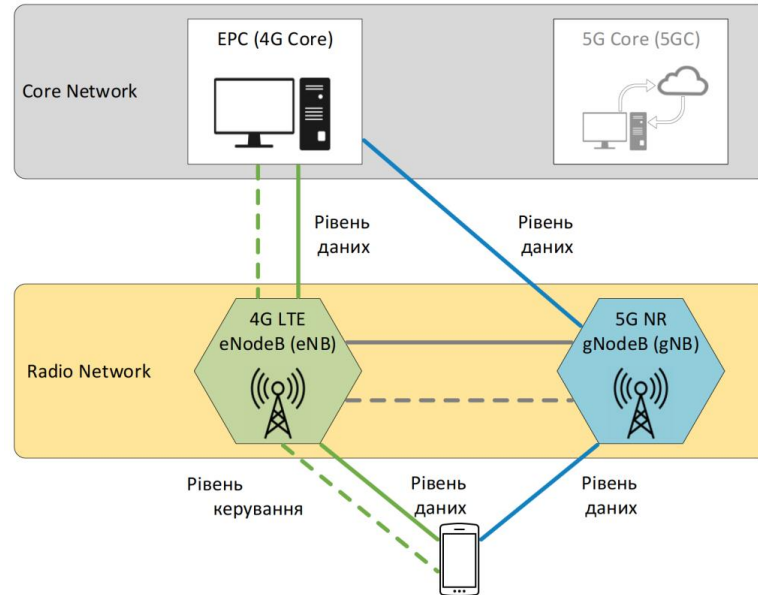


Рисунок 1.2 – Схема розгортання неавтономних мереж 5G

Під час початкового розгортання систем зв'язку 5G було виявлено низку проблем:

1. Високе енергоспоживання через збільшення обчислювального навантаження для забезпечення підвищеної пропускної спроможності передачі даних і надійності з'єднання. Причому ця проблема виявилася суттєвою як для користувацького обладнання, так і для базових станцій.

2. Низький рівень потужності прийнятого сигналу базовою станцією від призначеного для користувача обладнання під час роботи в мережах зв'язку 5G через збільшення робочої частоти сигналу, що передається, під час переходу із середньочастотного діапазону систем 4G (до 4 ГГц) у середньочастотний діапазон систем 5G (до 6 ГГц). Отже, для підтримання колишнього рівня завадозахищеності потрібен комплекс заходів зі зниження ймовірності пакетних помилок під час передання висхідним каналом зв'язку, тобто від користувацького обладнання базової станції.

3. Компенсація нелінійних спотворень сигналу, що виникають на передавачі обладнання користувача. У разі збільшення смуги частот, використовуваної для передавання даних у мережах 5G, для підтримання попереднього рівня енерговитрат на передавання сигналу, підсилювачу потужності (power amplifier, PA) на передавачі користувацького обладнання доводиться переходити в нелінійніший режим, що, проте, тягне за собою додаткові енерговитрати користувацького обладнання на компенсацію нелінійних спотворень.

### 1.3 Енергоефективність абонентського обладнання в мережах 5G

Сектор радіозв'язку Міжнародного Союзу Електрозв'язку (МСЕ-Р) визначає енергоефективність як одну з мінімальних технічних вимог до продуктивності для стандарту систем мобільного стільникового зв'язку IMT-2020 (Міжнародний мобільний зв'язок 2020). Згідно зі звітом МСЕ-Р [1], енергоефективність пристрою можна оцінити, виходячи з двох критеріїв:

- 1) ефективності передавання даних у разі високої завантаженості системи зв'язку;
- 2) низького енергоспоживання за відсутності переданих даних.

Ефективне передавання даних у разі високої завантаженості системи зв'язку демонструється середньою спектральною ефективністю. Низьке енергоспоживання за відсутності даних можна оцінити за часткою часу, в якому користувач перебуває у сплячому режимі.

Час автономної роботи користувацького обладнання (user equipment, UE) є важливим аспектом користувацького досвіду, який впливає на впровадження нових поколінь обладнання та послуг 5G. Вкрай важливо вивчити енергоспоживання призначеного для користувача обладнання для перших релізів мереж шостого покоління, а також визначити й ухвалити методи та принципи для поліпшення, щоб забезпечити енергоефективність призначеного для користувача обладнання для 5G, принаймні, не гіршу, ніж у UE в 4G.

У системах зв'язку стандарту NR призначені для користувача дані, як правило, є пакетними і передаються в дуже короткі проміжки часу. Одним з ефективних механізмів енергозбереження UE є забезпечення увімкнення UE для доступу до мережі з режиму енергозбереження в моменти часу, коли це необхідно.

Помітна частина споживаної користувацьким обладнанням енергії в 5G NR, як і в 4G LTE, припадає на режим доступу до мережі (RRC\_CONNECTED), що зумовлюється обробкою всієї агрегованої смуги частот, активними електричними радіочастотними ланцюгами приймання/передавання, моніторингом контрольної інформації, а також динамічними переходами в енергоощадний режим і виходами з нього. У системах зв'язку 5G дані для користувачів, як правило, передаються окремими пакетами за короткі проміжки часу. З цієї причини найефективнішим механізмом енергозбереження UE є увімкнення електричної схеми радіоприймача UE і моніторинг керівної (контрольної) інформації від базової станції щодо планування передавання даних низхідною лінією зв'язку (Downlink Control Information, DCI) лише в ті моменти часу, коли це необхідно. Оскільки більшу частину часу базова станція не передає дані конкретному користувачеві (або передає дуже невеликі обсяги даних), необхідна схема енергозбереження для призначеного для користувача

обладнання, що забезпечує динамічну адаптацію до зміни структури (патерну) трафіку даних, що надходять. Інакше кажучи, трафік пакетів даних часто буває дуже інтенсивним, з періодичними інтервалами передавання, за якими слідують триваліші періоди «мовчання». З точки зору затримки, корисно відстежувати керуючу сигналізацію низхідної лінії зв'язку (Downlink) від базової станції до користувача в кожному слоті, щоб отримувати гранти (дозволи) для передавання висхідною лінією зв'язку (Uplink grant) або передавання даних низхідною лінією зв'язку та миттєво реагувати на зміни в поведінці трафіку. Водночас такий графік моніторингу пов'язаний із великими витратами з погляду енергоспоживання пристрою, оскільки енерговитрати електричної схеми приймача в мобільному пристрої становлять більшу частину від його загального енергоспоживання.

Для забезпечення контролю над енергоспоживанням користувацького обладнання в стандарті LTE було впроваджено схему переривчастого прийому (discontinuous reception scheme, DRX scheme [1, 5]). Цю схему успадкував стандарт NR [2] з доопрацюваннями, що враховують нові нумерології, які підтримує стандарт зв'язку NR для систем зв'язку 5G.

Основним напрямком для подальшої роботи над підвищенням енергоефективності користувацького обладнання для стандарту NR систем мобільного зв'язку шостого покоління є всебічне поліпшення характеристик даної схеми [6 - 9].

#### 1.4 Висновки до розділу 1

На основі аналізу методів, що використовуються в системах зв'язку 5G для підвищення енергоефективності та завадостійкості користувацького обладнання, встановлено проблемні місця систем зв'язку шостого покоління початкового релізу NR Release 18 і визначено можливі напрямки розроблення нових методів або вдосконалення методів і алгоритмів, які використовуються, для підвищення енергоефективності та завадостійкості:

1. Методи, які забезпечують динамічну адаптацію стану користувацького обладнання в системах зв'язку 5G для поліпшення роботи схеми переривчастого приймання, що використовується в стандарті New Radio релізу NR Release-18.

2. Нова схема передавання даних висхідним каналом зв'язку для зниження порога завадостійкості систем зв'язку шостого покоління, що враховує недоліки та переваги схем, які використовуються, як-от міжслотове перемикання частоти та повторення передавання.

3. Метод боротьби на стороні приймача з нелінійними спотвореннями, викликаними на передавачі.

## 2 ПОКРАЩЕННЯ МЕТОДІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ КОРИСТУВАЦЬКОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ 5G NR

### 2.1 Опис системної моделі

Моделювання мереж зв'язку шостого покоління для вивчення схем енергоощадності користувачького обладнання проводиться з використанням симулятора системного рівня 5G, у якому можна виокремити такі основні блоки:

1. Розгортання мережі: розташування базових станцій згідно з типовою структурою мережі мобільного стільникового зв'язку, генерація координат користувачів випадковим чином (див. рисунок 2.1), вибір та ініціалізація зв'язку з базовою станцією (base station, BS) для кожного користувача.

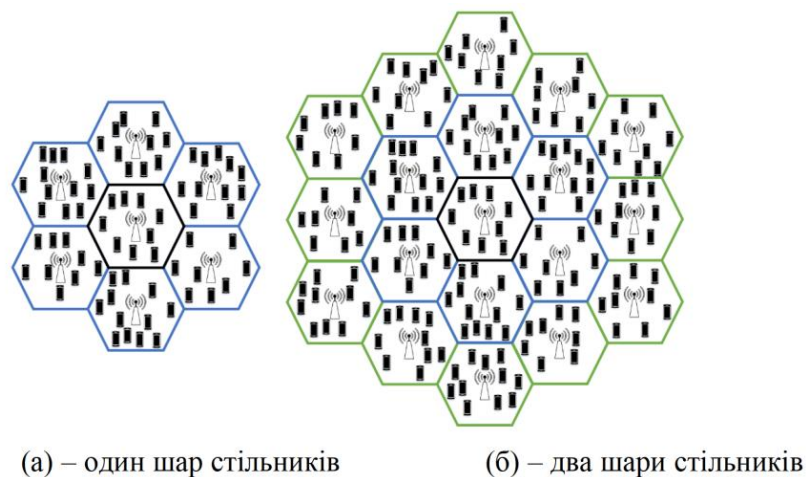


Рисунок 2.1 – Структура мережі мобільного стільникового зв'язку

2. Генерація каналу зв'язку з подальшим оновленням у процесі симуляції системи зв'язку.

3. Генерація зворотного зв'язку про стан каналу від користувача.

4. Блок обробки стану користувача згідно з алгоритмом роботи DRX схеми.

5. Планувальник передач на базовій станції, що обирає користувача (групу користувача для MIMO схеми передавання), оптимальний ранг (кількість

просторових каналів передавання) та оптимальну конфігурацію діаграми спрямованості, використовуючи багатокористувацький алгоритм пропорційного справедливого розподілу обслуговування.

6. Блок обліку інтерференції між базовими станціями.

7. MMSE приймач.

8. Абстракція оцінки каналу зв'язку для імітації помилки під час оцінювання.

9. Абстракція каналного кодування/декодування на фізичному рівні для схеми завадостійкого кодування з використанням кодів з малою щільністю перевірки на парність (low-density parity-check, LDPC) зі стандарту зв'язку NR.

2.1.1 Сценарії моделювання бездротових мобільних систем зв'язку на системному рівні

Існують три ключові сценарії, розроблені 3GPP для моделювання систем зв'язку четвертого і шостого поколінь на системному рівні [10]:

1. Urban Micro, UMi (відкрита місцевість): базові станції монтуються нижче рівня дахів навколишніх будівель. Відкритий майданчик UMi призначений для імітації реальних сценаріїв, як-от місто або привокзальна площа. Ширина типового відкритого майданчика становить близько 50 - 100 м.

Приклад для низхідного каналу зв'язку:

1) висота передавача (базової станції): 10 м

2) висота приймача: 1,5 - 2,5 м

3) розмір географічного осередку мережі зв'язку, ISD: 200 м.

2. Urban Macro, UMa: базові станції монтуються над рівнями дахів навколишніх будівель.

Приклад для низхідного каналу зв'язку:

1) висота передавача (базової станції): 25 м

2) висота приймача: 1,5 - 2,5 м

3) розмір географічного осередку мережі зв'язку, ISD: 500 м.

3. Indoor (усередині приміщення) сценарій: призначений для опису різних типових сценаріїв розгортання мережі зв'язку усередині приміщень, включно з офісними приміщеннями та торговими центрами. Типове офісне середовище складається з відкритих кабінетів, відокремлених стінами офісів, відкритих майданчиків, коридорів тощо. Базові станції монтуються на висоті 2-3 м або на стелях, або на стінах. Торгові центри часто мають висоту 1-5 поверхів і можуть містити відкритий майданчик, розділений кількома поверхами. У такому разі базові станції монтуються на висоті приблизно 3 м на стінах або стелях коридорів і цехів.

#### 2.1.2 Моделі трафіку мобільних систем зв'язку

Перед початком розроблення систем бездротового мобільного зв'язку четвертого покоління 4G LTE моделі трафіку були представлені на 3GPP TSG-RAN1#48 у документі [11], що містить конкретні приклади та відповідні параметри для кожної моделі для вивчення продуктивності мереж зв'язку на фізичному рівні. Він включає комплексні моделі трафіку для найбільш важливих сервісів, таких як FTP, перегляд веб-сторінок, потокове відео, ігри та модель голосового трафіку VoIP.

У таблиці 2.1 показано відсотковий розподіл трафіку користувачів мобільних систем зв'язку.

Модель трафіку передавання голосу за протоколом IP Розглянемо просту модель голосової активності з двома станами, показану на рисунку 2.2.

У даній моделі ймовірність переходу зі стану 1 (активний мовленнєвий стан) у стан 0 (неактивний або беззвучний стан), перебуваючи в стані 1, дорівнює  $a$ , в той час як ймовірність переходу зі стану 0 у стан 1, перебуваючи в стані 0, дорівнює  $c$ . Передбачається, що стан у моделі оновлюється з частотою, що дорівнює частоті кадрів мовного кодера  $R = 1/T$ , де  $T$  - тривалість кадру кодера (зазвичай 20 мс).

Таблиця 2.1 - Процентний розподіл трафіку користувачів

| Модель          | Категорія трафіку                                 | Відсоток користувачів |
|-----------------|---------------------------------------------------|-----------------------|
| FTP             | Сервіс із негарантованою доставкою                | 10%                   |
| Web Browsing    | Інтерактивний                                     | 20%                   |
| Video Streaming | Потокове передавання даних                        | 20%                   |
| VoIP            | Трафік з передачею в реальному часі               | 30%                   |
| Gaming          | Інтерактивний трафік з передачею в реальному часі | 20%                   |

Якщо  $P_1$  і  $P_2$  - відповідно ймовірності перебування в стані 0 і стані 1, то:

$$P_0 = \frac{a}{a+c}, \quad (2.1)$$

$$P_1 = \frac{c}{a+c}. \quad (2.2)$$

Основним параметром моделі є коефіцієнт голосової активності (Voice Activity Factor, VAF), який може бути обчислений з даних вище ймовірностей і дорівнює:

$$\lambda = P_1 = \frac{c}{a+c}. \quad (2.3)$$

Мовний потік (talk-spurt, TS) визначається як період часу  $\tau_{TS}$  між входом в активний стан (стан 1) і виходом з активного стану.

Середня тривалість мовного потоку  $\mu_{TS}$ , вимірювана в голосових кадрах, визначається як:

$$\mu_{TS} = \frac{1}{a}. \quad (2.4)$$

Так само визначається середня тривалість періоду мовчання (silent period, SP):

$$\mu_{SP} = \frac{1}{c}. \quad (2.5)$$

Оскільки переходи станів зі стану 1 у стан 0 і навпаки незалежні, середній час  $\mu_{AE}$  між входами в активні стани визначається сумою середніх часів у кожному стані:

$$\mu_{AE} = \mu_{TS} + \mu_{SP}. \quad (2.6)$$

Відповідно, середня частота  $R_{AE}$  настання переходу в активний стан дорівнює:

$$R_{AE} = \frac{1}{\mu_{AE}}. \quad (2.7)$$

Модель FTP трафіку. Сеанс FTP - це послідовність передач файлів, розділених часом їх читання. Двома основними параметрами сеансу FTP є:

1. Розмір  $S$  переданого файлу;
2. Час читання  $D$  - інтервал часу між генераціями попереднього файлу і наступного.

Під час вивчення систем зв'язку шостого покоління стандарту NR також виокремлюють модель трафіку миттєвих повідомлень (Instant messaging), що є певною конфігурацією FTP model 3 з розміром пакета  $S = 0,1$  Мбайт і середнім часом читання  $\langle D \rangle = 2$  сек.

Модель трафіку перегляду веб-сторінок У моделі інтерактивного трафіку Web-browsing веб-сторінка складається з основного об'єкта та вбудованих об'єктів (наприклад, зображень, реклами тощо). Після отримання головної сторінки веб-браузер виконує синтаксичний аналіз для пошуку вбудованих

об'єктів і здійснюється скачування знайдених вбудованих об'єктів. Основними параметрами, що характеризують модель трафіку перегляду веб-сторінок, є:

1. Розмір основного об'єкта  $S_M$ ;
2. розмір вбудованого на сторінці об'єкта  $S_E$ ;
3. кількість вбудованих об'єктів  $N_D$ ;
4. час читання  $D$ ;
5. час синтаксичного аналізу сторінки  $T_P$ .

Модель трафіку потокового відео. У даній моделі трафіку потокового відео (Video Streaming) кожен кадр відеоданих надходить із періодом  $T$ , який визначається кількістю кадрів на секунду. Кожен кадр розбивається на фіксовану кількість фрагментів, кожен з яких передається як один пакет. Затримка кодування між фрагментами кадру задається часом роботи відеокодера.

Модель ігрового трафіку. За аналогією з моделлю FTP трафіку, модель ігрового трафіку (Gaming) описується двома основними параметрами:

1. Розмір  $S$  переданого файлу;
2. Час читання  $D$  - інтервал часу між надходженнями попереднього файлу і наступного.

## 2.2 Методи підвищення енергозбереження абонентського обладнання для 5G

Перший із недоліків DRX схеми приймання обумовлюється тим, що в NR Release-18 UE пробуджується, тобто вмикає електричну схему приймача, на початку кожного DRX циклу. Таким чином, коли жоден пакет не доступний для певного UE, витрачається енергія на увімкнення електричної схеми радіоприймача, моніторинг контрольної інформації впродовж On duration, і на перехід UE в режим сну, тобто вимкнення електричної схеми радіоприймача. Такі ситуації виникають часто в разі розрідженого трафіку.

Для усунення цього недоліку в [4] було запропоновано використовувати сигнал пробудження (wake-up signal, WUS) UE, який передають від базової

станції кожному UE перед циклом DRX, який повідомляє про відсутність/наявність доступного пакета для певного UE. Таким чином, цей сигнал вказує - чи потрібно UE переходити в активний режим і, отже, дозволяє UE пропускати On duration у DRX циклах, коли BS не має пакета для цього UE. Також сигнал пробудження дає змогу уникати зайвого споживання енергії для переходів зі сплячого режиму в активний стан перед On duration і переходів з активного стану в сплячий режим після On duration, тобто ввімкнення та вимкнення електричної схеми радіоприймача, відповідно.

На рисунку 2.3 показано приклад роботи схеми переривчастого приймання під час використання сигналу пробудження UE. На цьому прикладі завдяки передаванню wake-up сигналу скорочення енергоспоживання UE відбулося за рахунок пропуску першого і третього DRX циклів.

Таким чином, приблизна формула виграшу в енергозбереженні UE завдяки використанню сигналу пробудження UE може бути записана як:

$$G_{WUS} = N_{DRX_0} \cdot D_{On\ duration} \cdot E_{PDCCCH} - N_{DRX} \cdot E_{WUS}, \quad (2.8)$$

Основним слабким місцем схеми переривчастого приймання є активація таймера Inactivity після передавання останнього пакета, тобто коли на базовій станції більше немає даних для передавання на користувацьке обладнання. Цей недолік чинить більший негативний вплив на енергоефективність обладнання користувача через відносно більшу тривалість Inactivity timer порівняно з таймером On duration. Наприклад, для стандартних параметрів моделі трафіку FTP 3 оптимальна (з погляду збереження затримки передавання даних) конфігурація DRX циклу містить таймер On duration, що дорівнює 8 мс, і Inactivity timer, що дорівнює 100 мс.

Для вирішення цієї проблеми в [14] було запропоновано ввести в стандарт NR сигнал переходу UE в режим сну (go-to-sleep) на фізичному рівні.

Використання цього сигналу можна вважати поліпшеним варіантом сигналу переходу в режим сну, що передається від базової станції користувачеві в

стандарті LTE на MAC рівні, який сигналізує UE перейти в режим сну до наступного циклу DRX.

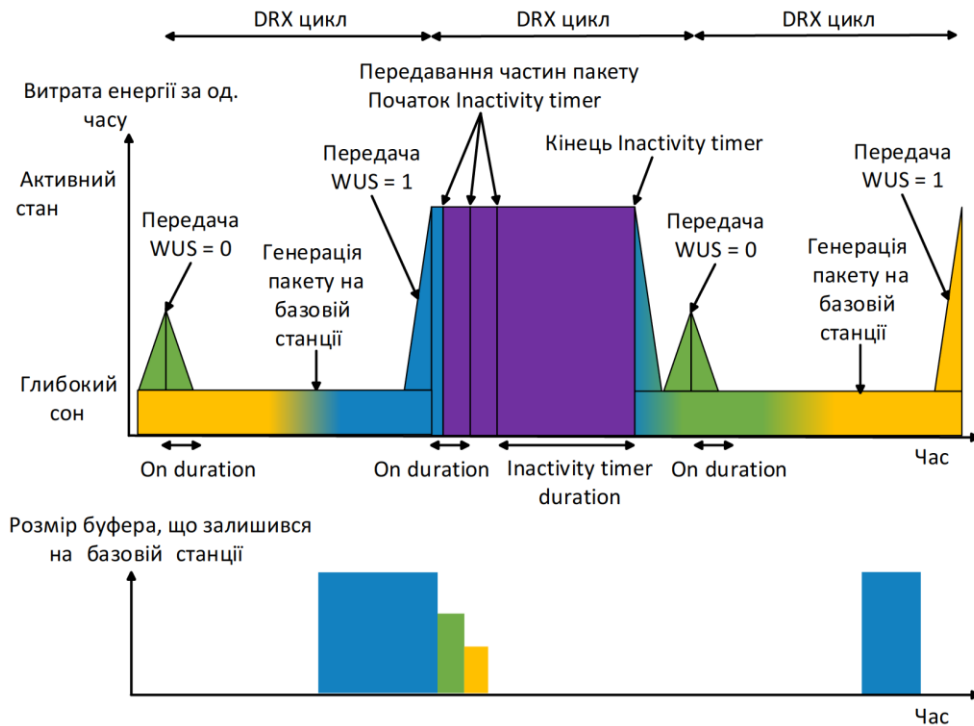


Рисунок 2.2 – Розподіл витрати енергії за часом у разі використання сигналу пробудження UE

Таким чином у стандарті LTE, після передачі останньої частини пакета користувач може уникнути зайвої витрати енергії на моніторинг контрольної інформації в PDCCH каналі протягом Inactivity timer, перейшовши в режим сну до наступного циклу DRX. Однак, у цього сигналу в стандарті LTE можна виділити два недоліки:

1. Цей сигнал переходу UE в режим сну передавався в спеціальній області заголовка пакета контрольного елемента (Control element, CE) на MAC рівні, що давало затримку приблизно 10 мс перед переходом у сон. Крім самого ефекту запізнювання переходу в режим сну, недоліком такої затримки була неможливість використання цього сигналу протягом таймера On duration,

оскільки більша частина конфігурацій довжини таймера On duration менша за 10 мс.

2. Другим недоліком MAC CE go-to-sleep сигналу попереднього покоління була обмеженість у його функціональності, оскільки він міг сигналізувати перейти в режим сну лише до наступного циклу DRX, тобто скасувати частину поточного циклу DRX, що залишилася. Таким чином, користувач пропускав таймер Inactivity повністю і міг пропустити момент приходу нового пакета на BS. У таблиці 2.2 показано, що для деяких моделей трафіку ймовірність генерації нового пакета протягом таймера Inactivity досить велика.

Запропонований у [15] і в цій роботі новий тип go-to-sleep сигналу передається на фізичному рівні, що дає змогу UE прийняти й обробити його з мінімально можливою затримкою, тобто за проміжок часу, менший або близько 1мс. Іншою перевагою нового типу go-to-sleep (GTS) сигналу є те, що він сигналізує про перехід у сон лише на певний час, який можна конфігурувати в кілька разів меншим за таймер Inactivity.

Таблиця 2.2 - Імовірність генерації нового пакета протягом таймера Inactivity

| <b>Модель трафіку</b> | <b>Імовірність генерації нового пакета протягом таймера Inactivity, %</b> |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| FTP model 3           | 41,76                                                                     |
| Instant messaging     | 4,65                                                                      |
| VoIP                  | 67,69                                                                     |
| Gaming                | 9,09                                                                      |
| Web browsing          | 15,88                                                                     |
| Video streaming       | 68,44                                                                     |

Таким чином, протягом таймера Inactivity UE може прокидатися кілька разів, доки не закінчиться таймер (див. рисунок 2.3) або доки не з'явиться новий пакет на BS (див. рисунок 2.4), що дає змогу швидко розпочати приймання нового пакету в разі його генерації на базовій станції протягом таймера Inactivity, водночас заощадивши велику кількість енергії.

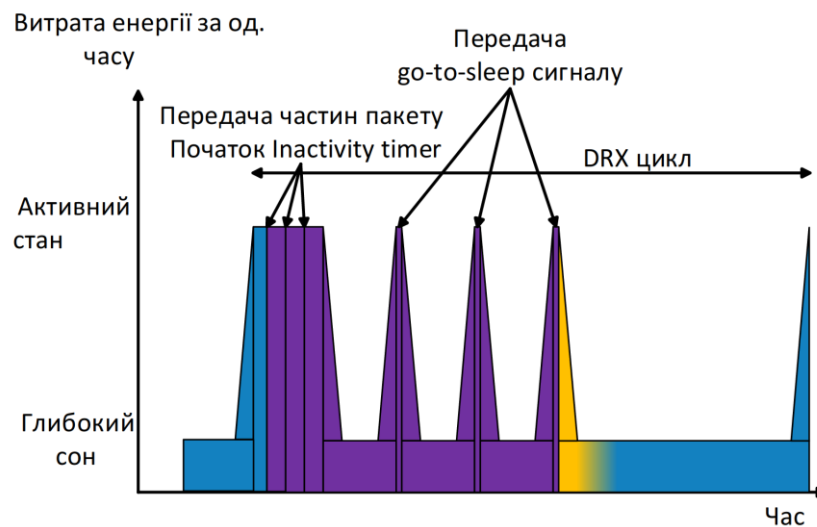


Рисунок 2.3 – Приклад роботи сигналу переходу в режим сну в разі відсутності генерації нового пакета протягом таймера Inactivity

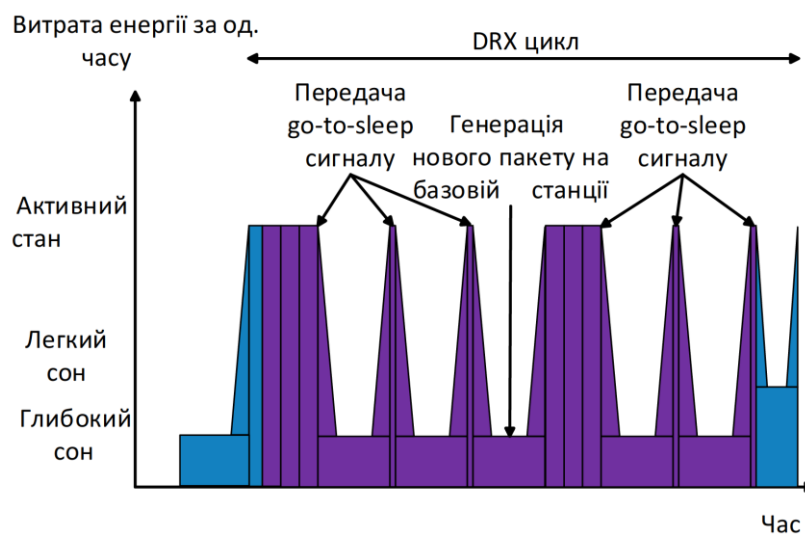


Рисунок 2.4 – Приклад роботи сигналу переходу в режим сну в разі генерації нового пакета протягом таймера Inactivity

На додаток до перерахованих переваг, мінімально можлива затримка обробки нового типу go-to-sleep сигналу дає змогу використовувати його протягом таймера On duration, коли на BS також немає пакетів для цього UE.

На рисунку 2.4 наведено графік витрати енергії користувачем під час використання запропонованого нового go-to-sleep сигналу за відсутності пакета на базовій станції протягом усієї тривалості таймера Inactivity, тобто для другого циклу DRX. Рисунок 2.5 відображає приклад графіка витрати енергії користувачем для випадку з генерацією пакета на BS під час таймера Inactivity.

При розгляді методів поліпшення енергозбереження користувацького обладнання для 5G можна окремо виділити дві схеми, які об'єднує те, що з технічного погляду, їхня реалізація підтримується системами зв'язку стандарту NR, починаючи з першого релізу NR Release-18, тому що для їхнього використання не потрібне впровадження додаткових сигналів ані на фізичному, ані на більш високих рівнях. Але ці схеми не були розглянуті з точки зору використання їх для поліпшення енергозбереження користувацького обладнання.

Системи зв'язку стандарту NR підтримують планування даних на пізніший слот часу, ніж той, у якому було отримано контрольну інформацію, що відрізняє їх від систем бездротового зв'язку стандарту LTE, де контрольну інформацію передають перед даними в одному й тому самому слоті.

З погляду енергозбереження, міжслотове планування передання (cross-slot scheduling) дає змогу UE переходити в режим мікросна до кінця слота після отримання контрольної інформації на його початку. Таким чином, UE не потрібно витрачати енергію на приймання протягом решти слота. Використання цієї схеми для додаткового енергозбереження UE в системах зв'язку 5G було запропоновано в патенті [12].

Адаптація конфігурації антенної решітки Другою природною схемою енергоощадності UE є використання різних конфігурацій антенної решітки UE під час приймання контрольної інформації та приймання даних шляхом вимкнення частини приймальних елементів під час моніторингу контрольної

інформації та подальшого її увімкнення після успішного отримання контрольної про заплановане передавання даних від BS. Це може забезпечити помітний вигреш у зниженні енергоспоживання з невеликим впливом на затримку передавання даних і пропускну здатність системи зв'язку, наприклад, у таких випадках:

1. Коли пакет переданих даних дуже малий. У такому разі, більш високе відношення потужності сигналу до потужності шуму (ПШШ), тобто додаткове посилення потужності передавання завдяки більшій кількості антен, не потрібне для доставлення користувачеві цілого пакету, використовуючи одну передачу.

2. Стан каналу досить добрий, отже, додаткове посилення потужності передавання, створюване за рахунок більшої кількості антен під час побудови діаграми спрямованості, не забезпечує видимого збільшення пропускну здатності.

3. Низька завантаженість трафіку даних. Такий випадок являє собою комбінацію випадків 1 і 2, тобто відносно малий розмір пакета даних і відносно велике ВСШ за рахунок відсутності колізій між UE і через великий середній час читання пакета даних.

### 2.3 Результати комп'ютерного моделювання

Ефективність і вигреш від використання запропонованих схем енергозбереження [13, 14] користувацького обладнання для систем бездротового зв'язку 5G було перевірено шляхом комп'ютерного моделювання на системному рівні. Моделювання низхідного каналу зв'язку (downlink, DL) проводилося для Urban Macro сценарію для частотного діапазону 1 (frequency region 1, FR1 [15]). Були обрані стандартні параметри для цього сценарію, такі як: несуча частота 4 ГГц, ширина смуги частот 100 МГц, відстань між піднесучими 30 кГц, відстань між BS, що дорівнює 200 м, тобто стандартні параметри для підтипу цього сценарію з щільним розташуванням BS (Dense Urban Macro) [16].

Для моделювання споживаної енергії користувачем було визначено типи часових слотів залежно від операції [17], яку користувач виконує в певному слоті, або, іншими словами, залежно від стану, у якому користувач перебуває в певному слоті. Модель споживаної енергії користувачем для кожного стану представлена в таблиці 2.3. Значення споживаної енергії за часовий слот у даній моделі подано в умовних одиницях після нормування на енергію, споживану в режимі глибокого сну. Таким чином, споживана енергія за часовий слот протягом режиму глибокого сну дорівнює одиниці.

Таблиця 2.3 - Модель споживаної енергії користувачем

| <b>Стан обладнання користувача</b>                | <b>Енергія, що споживається за часовий слот, в умовн. од.</b> |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Активний стан (моніторинг контрольної інформації) | 100                                                           |
| Приймання користувачем даних (частини пакету)     | 300                                                           |
| Режим мікросну                                    | 45                                                            |
| Режим легкого сну                                 | 20                                                            |
| Перехід в легкий сон                              | 100                                                           |
| Режим глибокого сну                               | 1                                                             |
| Перехід в глибокий сон                            | 450                                                           |
| Опрацювання сигналу пробудження UE                | 100                                                           |

Під час моделювання на системному рівні, як і в реальному сценарії розгортання систем зв'язку, користувачі можуть перебувати в різних умовах, що визначаються:

1) завантаженістю базових станцій сусідніх сот, це визначає рівень міжстільникової інтерференції (Inter-Cell Interference, ICI) і, отже, відношення потужності сигналу до загальної потужності шуму і перешкоди (відношення

сигналу перешкода шум, ОСПШ, signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR) на приймачі UE.

2) відстанню між UE і обслуговуючою BS через квадратичну залежність у вільному просторі втрат потужності сигналу від відстані між джерелом і приймачем. Також більш віддалені від базової станції, що обслуговує, користувачі опиняються ближче до базових станцій сусідніх сот, що також збільшує рівень міжстільникової інтерференції.

3) розташуванням UE всередині або поза приміщенням. Для призначеного для користувача обладнання, розташованого всередині приміщення, значне ослаблення SINR прийнятого сигналу спричинене втратами під час проходження сигналу всередину приміщення (penetration loss).

Через зазначені причини результати моделювання енергоефективності схеми DRX далі подано окремо для трьох груп користувачів, для яких SINR відповідає 5%, 50% і 95% рівням інтегральної функції розподілу SINR, що наведена на рисунку 2.5. На цьому рисунку показано отриману шляхом імітаційного моделювання розглянутої системи зв'язку інтегральну функцію розподілу, так званого, геометричного SINR, під час обчислення якого в потужності прийнятого сигналу не враховується підсилення діаграм спрямованості антенних решіток базової станції та користувацького обладнання.

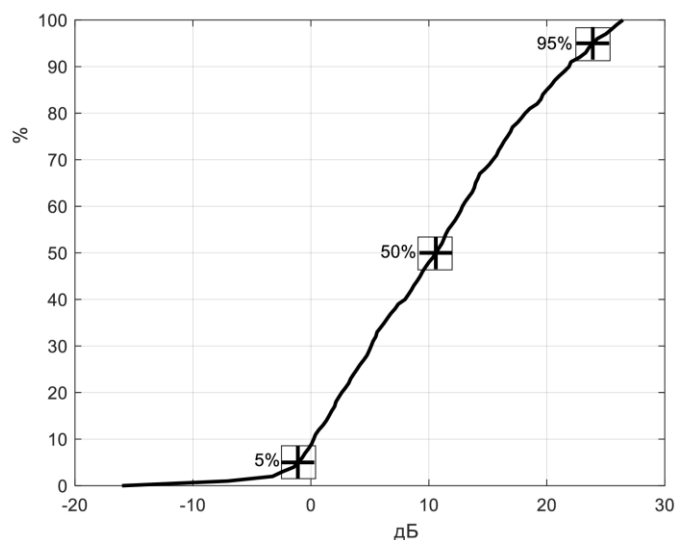


Рисунок 2.5 – Інтегральна функція розподілу SINR

У таблиці 2.4 наведено результати комп'ютерного моделювання системи бездротового мобільного зв'язку шостого покоління на системному рівні для всіх представлених моделей трафіку.

Таблиця 2.4 - Результати комп'ютерного моделювання схеми DRX

| SINR | Виграш в енергозбереженні, % |    |      |        |              |                 |
|------|------------------------------|----|------|--------|--------------|-----------------|
|      | FTP3                         | IM | VoIP | Gaming | Web browsing | Video streaming |
| 5%   | 51                           | 92 | 71   | 65     | 95           | 57              |
| 50%  | 55                           | 92 | 71   | 65     | 95           | 57              |
| 95%  | 56                           | 92 | 71   | 65     | 95           | 58              |

Отриманий шляхом імітування роботи системи зв'язку виграш в енергозбереженні користувацького устаткування завдяки використанню схеми переривчастого приймання DRX представлено для трьох основних точок інтегральної функції розподілу SINR (див. рисунок 2.5). Виграш розраховується у відсотковому відношенні і дорівнює зменшенню середнього значення споживаної енергії за одиницю часу під час використання схеми DRX порівняно з конфігурацією роботи UE без використання схеми DRX, тобто порівняно з UE, яке перебуває постійно в активному стані.

Для проведення більш детального аналізу енергоефективності системи на додаток до параметрів кожної моделі трафіку і конфігурації DRX циклу доцільно використовувати інформацію про завантаженість частотно-тимчасових ресурсів на базовій станції під час моделювання різних моделей трафіку, що дає змогу оцінити верхню межу можливого скорочення споживаної UE енергії. Цю оцінку можна отримати шляхом знаходження середнього відсотка невикористаних частотно-часових ресурсів системи зв'язку без застосування схеми переривчастого приймання DRX. У таблиці 2.5 наведено частки використаних (рядок 1) і невикористаних ресурсів (рядок 2) на базовій станції для всіх

аналізованих у цій роботі моделей трафіку. У третьому рядку таблиці наведено оцінку можливого додаткового скорочення споживаної UE енергії, що не досягається схемою DRX. Значення оцінки отримано для UE з медіанним (50%) рівнем SINR шляхом віднімання від середнього відсотка невикористаних частотно-часових ресурсів (рядок 2 таблиці 2.5) досягнутого виграшу в енергозбереженні під час використання DRX схеми (див. рядок 2 таблиці 2.5).

Таблиця 2.5 - Завантаженість ресурсів на базовій станції

|                                                                          | <b>FTP3</b> | <b>IM</b> | <b>VoIP</b> | <b>Gaming</b> | <b>Web browsing</b> | <b>Video streaming</b> |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|-------------|---------------|---------------------|------------------------|
| <b>Завантаженість ресурсів на базовій станції, RU, %</b>                 | 28          | 1         | 3,5         | 11            | < 1                 | 28                     |
| <b>Середня частка невикористаних частотно-часових ресурсів, %</b>        | 72          | 99        | 96,5        | 89            | >99                 | 72                     |
| <b>Скорочення споживаної UE енергії, що не досягається схемою DRX, %</b> | ~16         | ~7        | ~26         | ~24           | ~5                  | ~14                    |

Можливе скорочення споживаної UE енергії, що не досягається схемою DRX і наведене в рядку 3 таблиці 2.5, зумовлене неоптимальним розподілом інтервалів часу в DRX циклі і пов'язане здебільшого з інтервалами в режимі активного стану UE мобільного пристрою, коли на базовій станції відсутні пакети для цього призначеного для користувача обладнання.

У таблиці 2.6 представлені конфігурації сигналу переходу в режим сну для різних моделей трафіку.

Таблиця 2.6 - Конфігурації сигналу переходу в режим сну

| Модель трафіку    | Тривалість режиму сну на UE після отримання сигналу переходу в режим сну, мс |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| FTP model 3       | 40                                                                           |
| Instant messaging |                                                                              |
| Web browsing      |                                                                              |
| VoIP              | 10                                                                           |
| Gaming            |                                                                              |
| Video streaming   |                                                                              |

Модель трафіку FTP 3 Для моделі трафіку FTP 3 (File Transfer Protocol model 3) результати наведено для розширеного набору конфігурацій для вивчення ефективності скорочення енергії, споживаної користувацьким обладнанням, під час використання сигналу переходу в режим сну за різного завантаження частотно-часових ресурсів мережі зв'язку. Конфігурації наведено в таблиці 2.7.

На рисунку 2.6 показано виграш в енергозбереженні UE під час використання нового сигналу переходу UE в режим сну для базової конфігурації моделі трафіку FTP 3. Як видно з цього малюнка, новий go-to-sleep (GTS) сигнал із тривалістю в режимі сну, що дорівнює 40 мс, забезпечує значний виграш в енергоспоживанні, порівнюючи з конфігурацією схеми переривчастого приймання без використання сигналу переходу UE в режим сну для всіх трьох типів UE з інтегральної функції розподілу SINR.

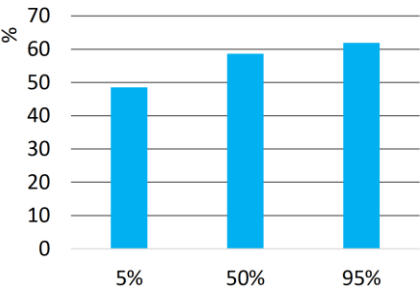


Рисунок 2.6 – Виграш GTS в енергозбереженні UE для FTP model 3

Таблиця 2.7 - Додаткові конфігурації моделі трафіку FTP 3

| Конфігурація моделі трафіку FTP 3 | Розмір пакету $S$ , Мбайт | Тривалість читання $D$ , мс |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Базова                            | 0,5                       | 200                         |
| Низька завантаженість (16%)       | 0,1                       | 80                          |
| Середня завантаженість (33%)      |                           | 40                          |
| Висока завантаженість (63%)       |                           | 20                          |

На рисунку 2.7 представлено результати порівняння часової затримки і середньої швидкості передавання даних для конфігурацій з використанням і без використання нового GTS сигналу переходу в режим сну. Можна помітити, що значний виграш в енергозбереженні (див. рисунок 2.7) призводить до деякого збільшення затримки і зниження середньої швидкості передачі пакета.

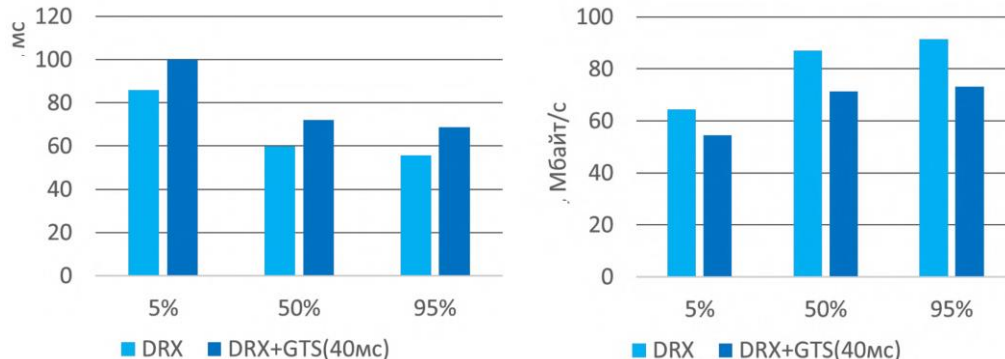


Рисунок 2.7 – Порівняння затримки та середньої швидкості передавання для конфігурацій із використанням і без використання сигналу переходу в режим сну

Водночас варто врахувати, що для моделі трафіку FTP 3 використовували максимально допустиму тривалість перебування UE в режимі сну, що дорівнює 40 мс після приймання сигналу GTS, тобто представлені втрати в затримці та пропускній здатності UE є максимальними для моделі трафіку FTP 3.

На рисунку 2.8 показано порівняння енергоефективності схеми DRX у разі використання сигналу GTS для трьох груп користувачів із різними SINR відносно конфігурації зі схемою DRX без використання сигналу GTS для різних значень параметрів моделі трафіку FTP 3 (див. таблицю 2.7), що забезпечують низьке (конфігурація 1), середнє (конфігурація 2) та високе (конфігурація 3) завантаження частотно-часових ресурсів мережі зв'язку.

Як видно з наведених на рисунку 2.8 даних, додатковий виграш у зниженні енергоспоживання в разі використання GTS сигналу за низького навантаження може досягати 76%. Також, GTS забезпечує значний виграш відносно схеми DRX у випадках середнього та високого завантаження, 64-74% та 39-58%, відповідно. Однак ці значення менші за значення, які спостерігаються в разі низького навантаження. Це пов'язано з тим, що сигнал GTS дає найбільший виграш в енергозбереженні в ситуаціях, коли існує лише невелика ймовірність того, що новий пакет буде згенеровано під час наступного таймера Inactivity.

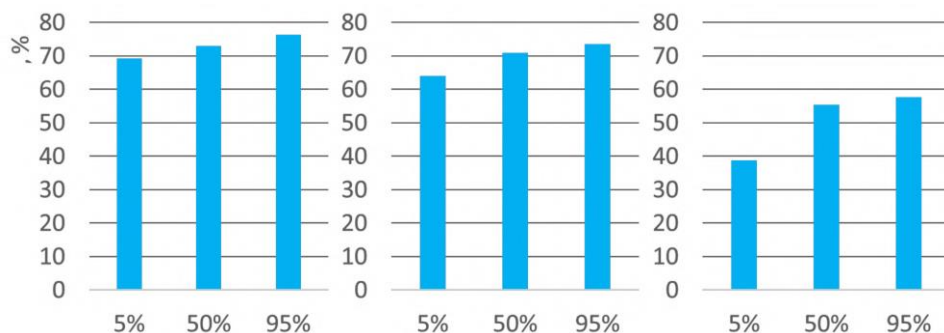


Рисунок 2.8 – Виграш GTS в енергозбереженні UE для конфігурацій моделі трафіку FTP 3 з різним завантаженням

У такому разі таймер Inactivity набагато довший, ніж необхідна тривалість приймання пакетів, і сигнал GTS забезпечує пропуск більшої частини активного періоду. У разі середніх і високих завантажень системи зв'язку існує вища ймовірність того, що станеться генерація нового пакета для UE під час таймера Inactivity, тому частина активного періоду, що займається прийомом пакетів, збільшується, і відповідно зменшується можливість поліпшення

енергозбереження завдяки використанню сигналу GTS, порівнюючи з випадком низького навантаження.

Також, з рисунка 2.8 можна побачити, що використання сигналу GTS забезпечує більше зниження енергоспоживання для UE в центрі комірки (стільники) стільникового зв'язку (95% - я група UE SINR), особливо в разі високого навантаження на трафік. Така залежність може бути пояснена збільшеною затримкою передавання пакетів для UE на кордоні стільники (5% - я група UE SINR) порівняно із затримкою для UE в центрі стільники. Менша затримка передавання для UE в центрі комірки призводить до більш швидкого початку використання сигналу GTS і, отже, до більш високого зниження енергоспоживання. Як показано в таблиці 2.7, різниця у виграші енергозбереження між розглянутими групами UE становить близько 7% за низького навантаження системи (Конфігурація 1), але вона збільшується до 19% за високого навантаження (Конфігурація 3). Проведений додатковий аналіз показав, що причиною цього є більше збільшення затримки передавання даних, спричинене збільшенням навантаження мережі, для UE на кордоні осередку, ніж у його центрі. Порівняння тривалості передавання пакета з використанням і без використання сигналу GTS для додаткових конфігурацій моделі FTP 3 наведено на рисунку 2.10.

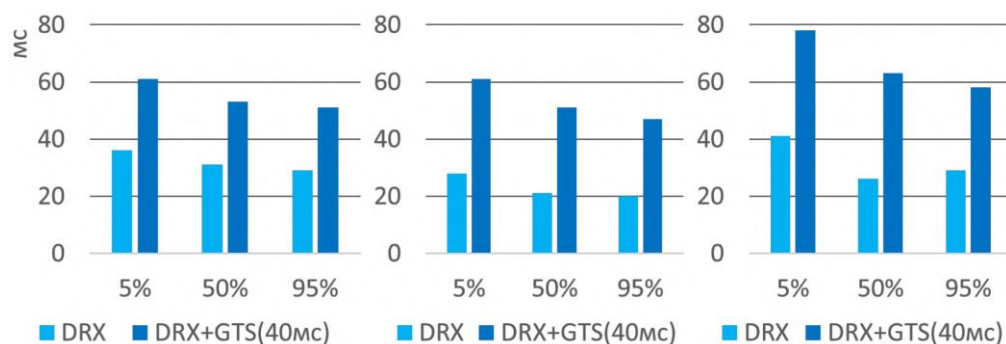


Рисунок 2.9 – Порівняння затримки передавання для конфігурацій з використанням і без використання сигналу переходу в режим сну для конфігурацій моделі трафіку FTP 3 з різним завантаженням

Модель трафіку обміну миттєвими повідомленнями. Як обговорювалося вище, у разі низького завантаження системи зв'язку призначене для користувача обладнання (UE) здебільшого перебуває в режимі сну, тому кожен період в активному стані помітно впливає на загальне енергоспоживання.

Передача даних у моделі трафіку миттєвих повідомлень (Instant messaging, IM) створює дуже низьку завантаженість частотно-часових ресурсів мережі. У цьому разі використання сигналу GTS забезпечує можливість пропустити більшу частину активного періоду, і тим самим, дає змогу досягти понад 67% виграшу в енергоспоживанні порівняно зі схемою DRX, як показано на рисунку 2.11.

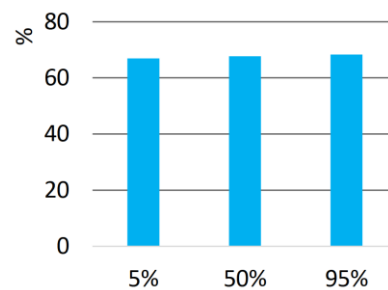


Рисунок 2.10 – Виграш GTS в енергозбереженні UE для моделі трафіку миттєвих повідомлень

На рисунку 2.11 також представлено результати порівняння затримки та середньої швидкості передавання даних для конфігурацій із використанням і без використання сигналу GTS.

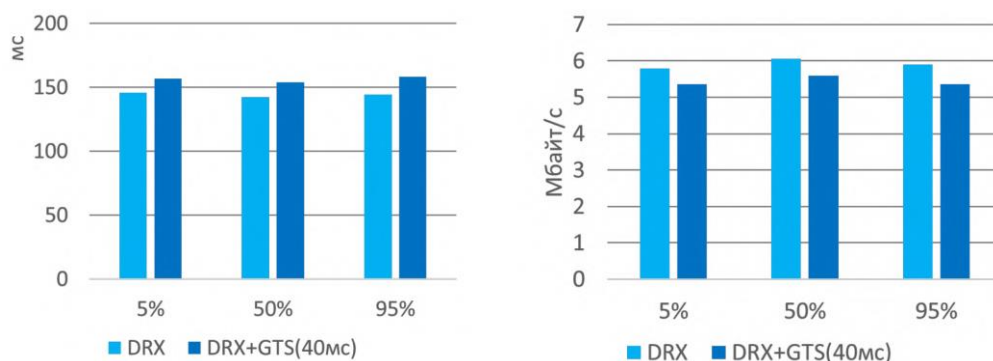


Рисунок 2.11 – Порівняння затримки та середньої швидкості передавання для конфігурацій із використанням і без використання сигналу переходу в режим сну

Модель трафіку передавання голосу за протоколом IP. В UE у моделі трафіку передавання голосу за протоколом IP (Voice over Internet Protocol, VoIP) існують два стани: активний і неактивний. Протягом активного періоду UE отримує новий пакет після кожного кадру кодера тривалістю  $T = 20$  мс. Розміри пакетів становлять близько 40 байт, що відносно мало навіть порівняно з пакетами в моделі трафіку обміну миттєвими повідомленнями. Виходячи з конфігурації схеми переривчастого прийому, UE витрачає мало часу в кожному циклі DRX на отримання двох невеликих пакетів за 40 мс циклу DRX. Як обговорювалося вище, у таких сценаріях, тобто за низького завантаження частотно-часових ресурсів, сигнал GTS забезпечує максимальний виграш у зниженні енергоспоживання UE.

З іншого боку, в неактивному стані UE отримує один пакет тільки кожні чотири цикли DRX. Таким чином, використання базової схеми DRX уже забезпечує значну перевагу порівняно з конфігурацією без використання схеми переривчастого приймання, тобто в неактивному стані виграш завдяки використанню сигналу GTS не може бути великим.

Як видно на рисунку 2.12, загалом для моделі трафіку VoIP використання сигналу GTS забезпечує значний виграш у зниженні енергоспоживання - 60%. Також на рисунку 2.13 представлено результати порівняння часової затримки та середньої швидкості передавання даних у разі використання і без використання сигналу GTS для моделі голосового трафіку за протоколом IP.

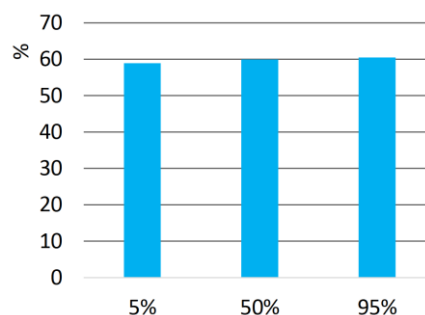


Рисунок 2.12 – Виграш GTS в енергозбереженні UE для моделі трафіку VoIP

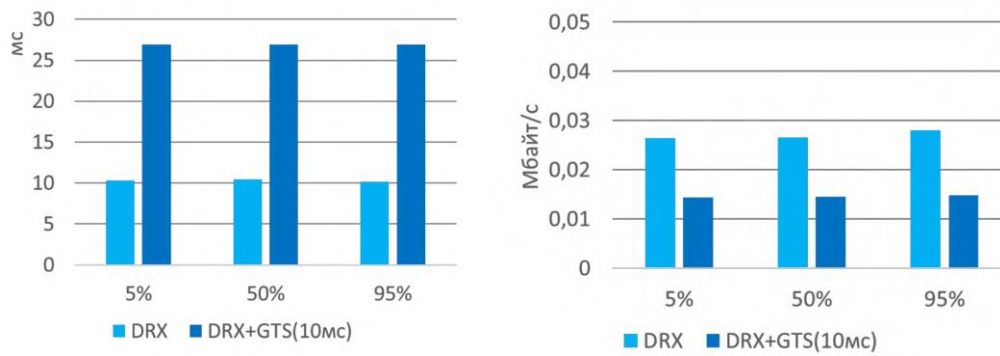


Рисунок 2.13 – Порівняння затримки та середньої швидкості передавання для конфігурацій із використанням і без використання сигналу переходу в режим сну

Модель ігрового трафіку. Розподіл пакетів у часі для UE в моделі ігрового трафіку дуже схожий на розподіл пакетів UE в активному стані в моделі трафіку VoIP. Єдина кількісна відмінність полягає тільки в середній кількості пакетів, що надходять за один цикл DRX тривалістю 40 мс - два пакети для VoIP проти одного пакета для моделі ігрового трафіку. Така відмінність ще більше збільшує кількість часових слотів активного стану, які пропускаються за рахунок використання сигналу GTS. Як видно на рисунку 2.14, сигнал GTS забезпечує вигреш у зниженні енергоспоживання UE приблизно на 68% для моделі ігрового трафіку.

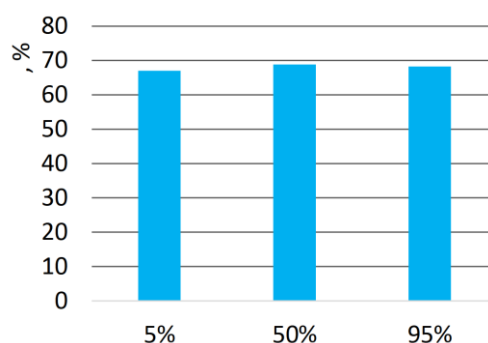


Рисунок 2.14 – Виграш GTS в енергозбереженні UE для моделі ігрового трафіку

Також на рисунку 2.15 представлено результати порівняння часової затримки і середньої швидкості передавання даних із використанням і без використання сигналу GTS для моделі ігрового трафіку.

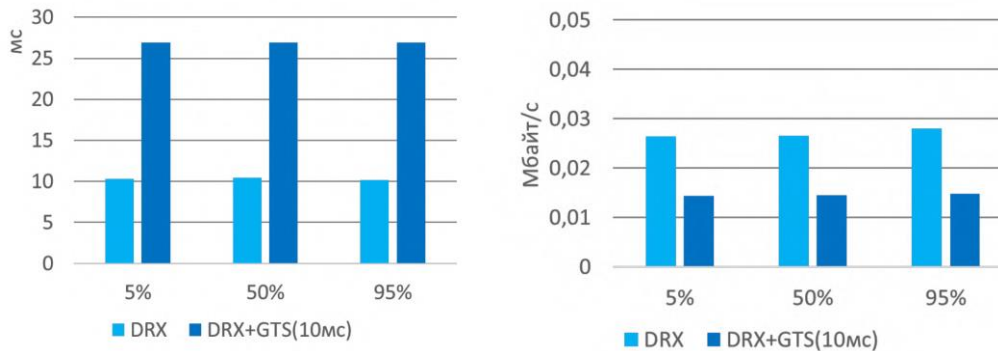


Рисунок 2.15 – Порівняння затримки та середньої швидкості передавання для конфігурацій із використанням і без використання сигналу переходу в режим сну

Модель трафіку перегляду веб-сторінок. Передавання даних у моделі трафіку перегляду веб-сторінок (Web-browsing) у середньому призводить до значно меншого, приблизно в 10 разів, використання частотно-часових ресурсів, ніж у разі обміну миттєвими повідомленнями. Це пов'язано з тим, що для такого типу трафіку середній час прибуття пакетів становить близько 30 сек. Однак розміри пакетів у моделі трафіку перегляду веб-сторінок набагато більші, тому UE витрачає більшу частину активного періоду на приймання пакета. Таким чином, виграш в енергоспоживанні для цієї моделі трафіку має бути порівнянний з таким для моделі трафіку миттєвих повідомлень. Як видно на рисунку 2.17, зниження енергоспоживання для моделі трафіку перегляду веб-сторінок при використанні сигналу GTS дорівнює приблизно 60%. Також на рисунку 2.18 представлено результати порівняння часової затримки і середньої швидкості передавання даних з використанням і без використання сигналу GTS для моделі трафіку перегляду веб-сторінок.

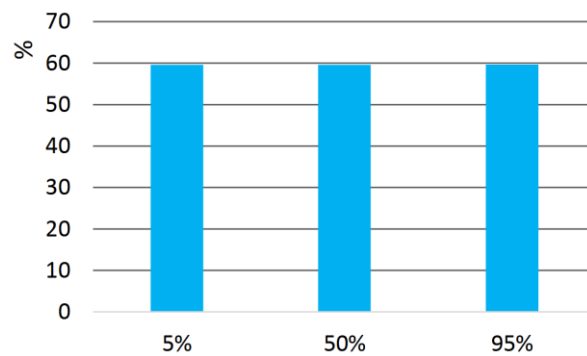


Рисунок 2.16 – Виграш GTS в енергозбереженні UE для моделі трафіку перегляду веб-сторінок

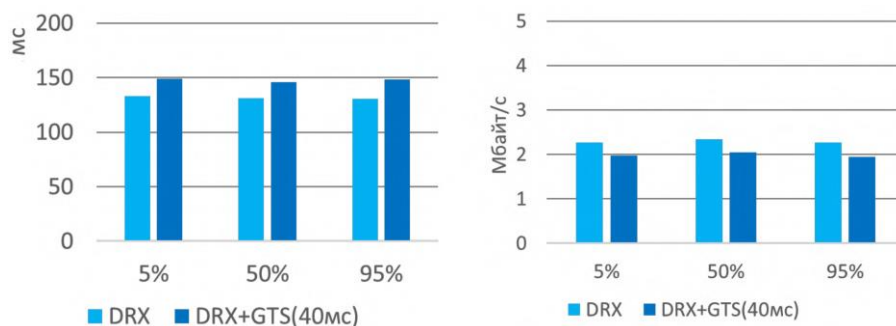


Рисунок 2.17 – Порівняння затримки та середньої швидкості передавання для конфігурацій із використанням і без використання сигналу переходу в режим сну

Під час моделювання трафіку потокового відео група з восьми пакетів надходить кожні 100 мс. Середній розмір таких фрагментів дорівнює 10 байт, тому загальний їхній розмір невеликий. Отже, UE не потрібно багато часу для приймання всієї групи пакетів на початку циклу DRX. Таким чином, використання сигналу GTS дає змогу пропустити більшу частину активних слотів.

На рисунку 2.18 представлено значення виграшу в зниженні енергоспоживання за рахунок використання сигналу GTS переходу UE в режим сну для моделі трафіку потокового відео. Як видно з наведених на цьому малюнку даних, використання сигналу GTS забезпечує виграш в

енергоефективності мінімум 70%. Також на рисунку 2.19 представлено результати порівняння часової затримки і середньої швидкості передавання даних з використанням і без використання сигналу переходу в режим сну для моделі трафіку потокового відео.

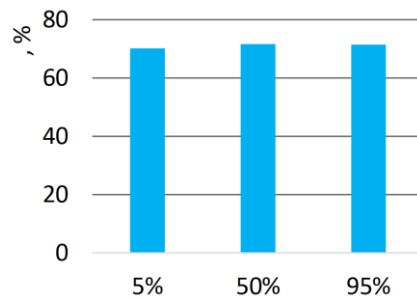


Рисунок 2.18 – Виграш GTS в енергозбереженні UE для моделі трафіку потокового відео

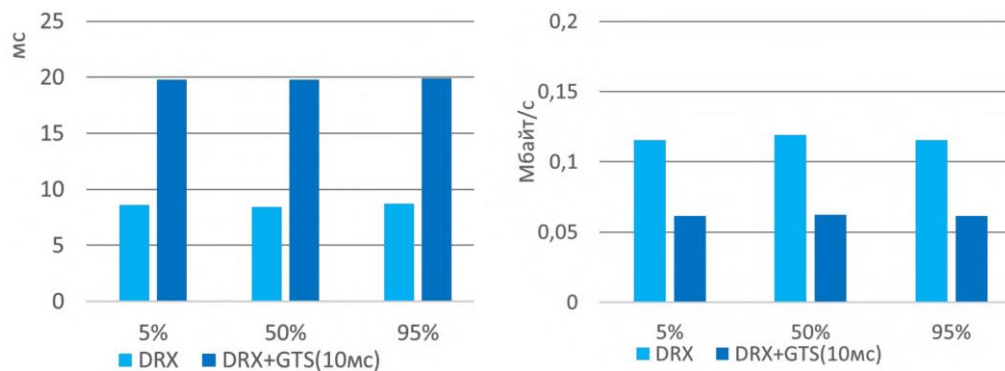


Рисунок 2.19 – Порівняння затримки та середньої швидкості передавання для конфігурацій із використанням і без використання сигналу переходу в режим сну

Оптимізація витрат енергії на моніторинг WUS. Щоб перевірити, з яким значенням передано сигнал пробудження UE (wake-up signal, WUS), тобто чи потрібно UE переходити в активний режим і вмикати таймер On duration, UE має перейти в спеціальний активний режим для моніторингу й обробки сигналу WUS перед кожним циклом DRX. Якщо пакета на BS немає, то передається WUS зі

значенням 0, і в такому разі UE переходить у стан сну, тобто пропускає один цикл DRX. У такому разі використання сигналів WUS дає змогу скоротити кількість споживаної UE енергії за рахунок пропуску On duration, але водночас UE вимушено витрачає додаткову енергію на моніторинг і обробку цих сигналів. Щоб зменшити накладні витрати на моніторинг і оброблення WUS, у патенті [19] було запропоновано об'єднати їх із періодичною операцією синхронізації UE, тобто проводити операцію оброблення сигналу WUS і сигналу синхронізації протягом загального активного періоду. Для здійснення цього об'єднання замість блоку синхронізаційних сигналів (synchronization signal block, SSB) було запропоновано використовувати для синхронізації передачу опорного сигналу інформації про стан каналу (channel state information reference signal, CSI RS), що також підтримується стандартом NR систем зв'язку 5G. Таким чином, за певної конфігурації періодів передавання сигналів WUS і CSI RS можливе одночасне їхнє передавання перед початком циклу DRX, отже, для виконання обох процедур, синхронізації UE і моніторингу сигналу WUS, потрібен тільки один активний період.

На рисунку 2.21 показано порівняння вигравів в енергоспоживанні завдяки використанню сигналу WUS для моделі трафіку FTP 3 і трьох конфігурацій сигналу, що використовується для синхронізації:

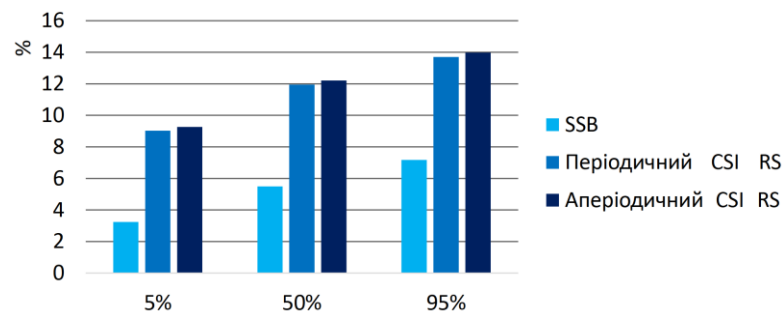


Рисунок 2.20 – Порівняння вигравів WUS при використанні різних сигналів для синхронізації

1. Для синхронізації використовується сигнал SSB. У такому разі не можна об'єднати операції синхронізації та моніторингу WUS.
2. Для синхронізації використовуються періодичні сигнали CSI RS.
3. Для синхронізації використовуються аперіодичні CSI RS. У такій конфігурації UE може пропустити обробку CSI RS, якщо отримано нульовий біт у сигналі WUS.

З гістограм, наведених на рисунку 2.20, видно, що використання для синхронізації аперіодичних сигналів CSI RS дає змогу одержати суттєве збільшення виграшу (у 2-3 рази) в енергозбереженні, як порівняти з використанням сигналів SSB. Таким чином, під час використання сигналів пробудження WUS для синхронізації переважно використовувати аперіодичні CSI RS.

Далі, під час аналізу ефективності в енергозбереженні UE сигналу пробудження, не враховуються витрати UE на синхронізацію.

Ефективність сигналу пробудження в енергозбереженні UE. На рисунках 2.21 і 2.22 наведені значення виграшу в енергозбереженні від використання сигналу пробудження UE (WUS) для різних моделей трафіку, отримані шляхом імітаційного моделювання системи стільникового зв'язку 5G з параметрами, представленими в [16].

Як було описано вище, сигнал WUS дає змогу користувацькому обладнанню (UE) пропускати період On duration у DRX циклах, коли BS не має пакета для цього UE. Таким чином, для випадків із низьким завантаженням частотно-часових ресурсів мережі зв'язку застосування сигналу WUS забезпечує значне зниження енергоспоживання UE. Це підтверджується даними, наведеними на рисунках 2.21 і 2.22. Як видно з отриманих результатів, виграш у зниженні споживаної UE енергії для моделей трафіку обміну миттєвими повідомленнями (Instant messaging) і перегляду веб-сторінок (Web-browsing) досягає значень 43% і 67,5%, відповідно.

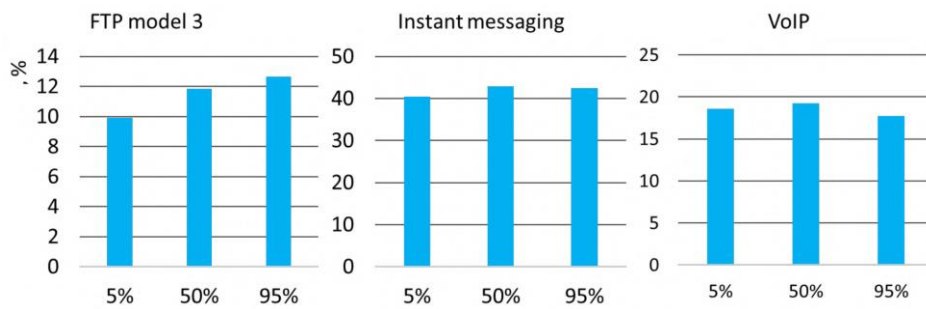


Рисунок 2.21 – Виграш WUS в енергозбереженні UE для моделей трафіку FTP 3, Instant messaging і VoIP

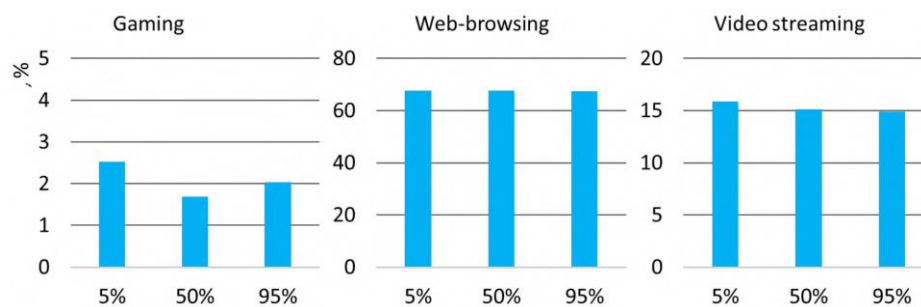


Рисунок 2.22 – Виграш WUS в енергозбереженні UE для моделей трафіку Gaming, Web-browsing і Video streaming

Однак, як видно з конфігурацій значень параметрів схеми переривчастого приймання (DRX) для різних моделей трафіку, що наведені в [17], тривалість таймера On duration є малою частиною від загальної тривалості циклу DRX. Отже, використання сигналу WUS не може забезпечити такого ж значного виграшу в зниженні енергоспоживання користувацького обладнання для випадків із середнім і високим завантаженням частотно-часових ресурсів мережі зв'язку, таких як FTP3, VoIP і Video streaming, що також було підтверджено шляхом імітаційного моделювання системи зв'язку 5G (див. рисунки 2.21 і 2.22).

Міжслотове планування передачі, що підтримується NR, дає змогу UE після отримання контрольної інформації переходити в режим мікросну до кінця часового слота. Крім того, за такої схеми планування передачі UE може скоротити обробку всієї виділеної смуги частот до певної смуги частот,

сконфігурованої для моніторингу контрольної інформації, що дає змогу додатково скоротити витрату енергії.

При моделюванні 5G на системному рівні для аналізу ефективності міжслотового планування передачі, до моделі споживаної енергії, представленій в [18], було додано стан моніторингу контрольної інформації в разі використання міжслотового планування передачі зі значенням споживаної енергії, що дорівнює 70 умовних од.

У стандарті зв'язку NR параметр  $K_0$  відповідає за часовий інтервал між передачею BS контрольної інформації в каналі PDCCH і передачею даних у каналі PUSCH. Якщо  $K_0 = 0$ , то контрольну інформацію і дані передають в одному часовому слоті, тобто використовується однослотове планування передачі.

Для моделювання міжслотового планування передачі було використано значення  $K_0 = 1$ .

Як показано на рисунку 2.23, на яких представлено виграші в енергоспоживанні завдяки міжслотовому плануванню передачі для моделей трафіку FTP 3, Instant messaging і VoIP, використання міжслотового планування може забезпечити значущий виграш в енергозбереженні UE.

Виходячи з результатів, представлених на рисунках 2.23 і 2.24, міжслотове планування призводить до низького збільшення затримки передавання пакетів (див. рисунок 2.24), але при цьому забезпечує зниження енергоспоживання UE приблизно на 20% для всіх моделей трафіку.

Аналіз ефективності адаптації конфігурації антенної решітки Для аналізу ефективності адаптації конфігурації антенної решітки для енергозбереження UE було проведено порівняння двох конфігурацій антенної решітки UE:

1. Стандартна конфігурація антенної решітки UE з чотирма приймально-передавальними елементами [19].
2. Конфігурація антенної решітки UE з кількістю приймально-передавальних елементів, зменшеною до двох.

Метою цього аналізу було перевірити, чи виконуються умови ефективності адаптації конфігурації антенної решітки, описані в [20].

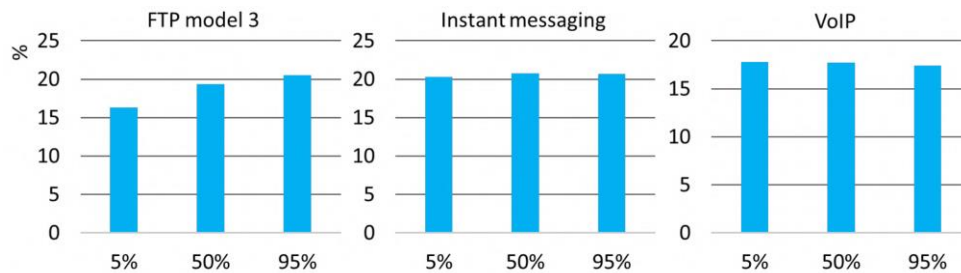


Рисунок 2.23 – Виграш в енергозбереженні при  $K0=1$

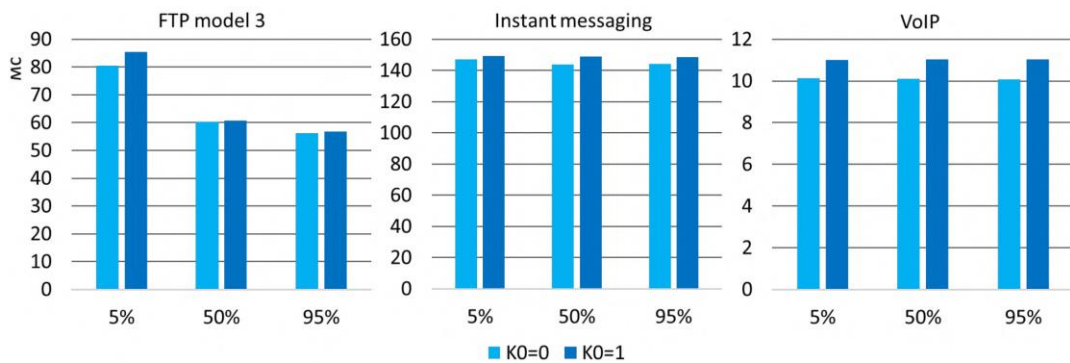


Рисунок 2.24 – Порівняння затримки передачі для  $K0=0$  і  $K0=1$

На рисунку 2.25 показано виграш в енергозбереженні за рахунок зменшення кількості приймально-передавальних елементів. На рисунку 2.26 представлено порівняння затримки передачі даних для конфігурацій антенної решітки UE для моделей трафіку FTP 3, обміну миттєвими повідомленнями та голосового зв'язку. На цих рисунках, конфігурація антенної решітки UE з чотирма приймально-передавальними елементами підписана як «4RX», а конфігурація з двома елементами підписана як «2RX».

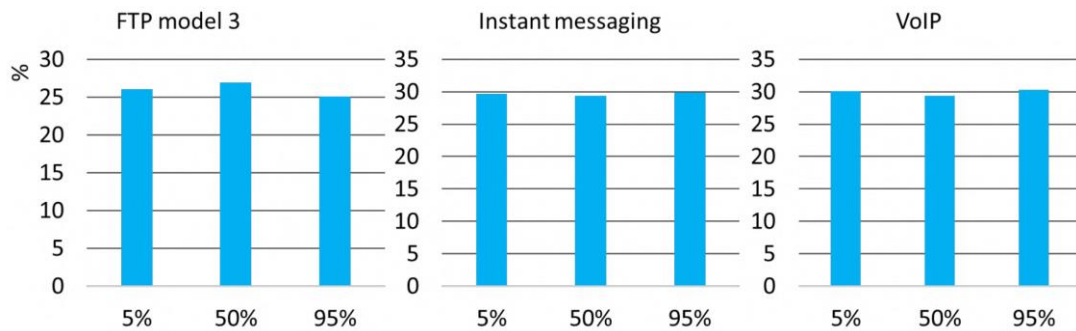


Рисунок 2.25 – Виграш в енергозбереженні при використанні адаптації антенної решітки

Як видно з представлених порівнянь, для моделей трафіку голосового зв'язку та обміну миттєвими повідомленнями виграш в енергозбереженні UE становить близько 30%, що більше, ніж для моделі трафіку FTP 3. Також, порівняно з моделлю трафіку FTP 3, втрата в затримці передавання даних моделей трафіку незначна.

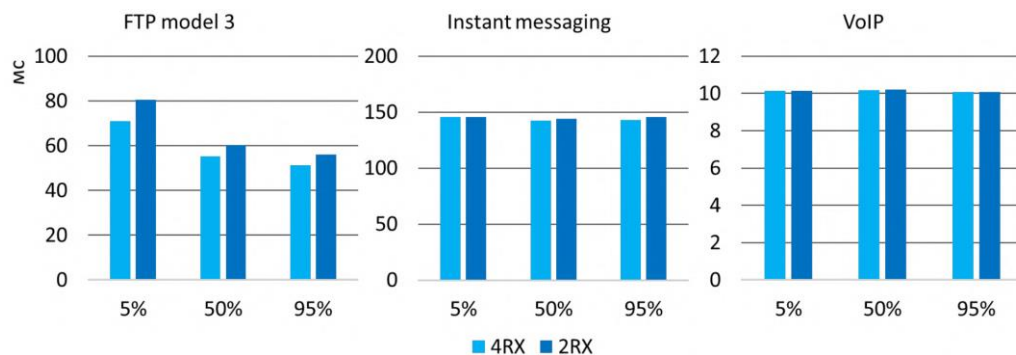


Рисунок 2.26 – Порівняння затримки передавання для конфігурацій із двома та чотирма приймально-передавальними елементами

Таким чином, можна зробити висновок, що припущення про умови ефективності адаптації конфігурації антенної решітки було правильним, оскільки модель голосового трафіку є прикладом виконання першої умови (малий розмір пакета), а модель трафіку обміну миттєвими повідомленнями є прикладом виконання третьої умови (низька завантаженість трафіку).

## 2.4 Висновки до розділу 2

У Розділі 2 було розглянуто завдання енергозбереження користувацького обладнання в системах бездротового мобільного зв'язку. Під час роботи було реалізовано сценарії моделювання систем бездротового мобільного зв'язку та моделі трафіку даних, прийняті консорціумом 3GPP, а також проведено детальний аналіз роботи схеми переривчастого приймання DRX, використовуваної для енергозбереження призначеного для користувача обладнання в першому релізі NR Release 18 систем стільникового мобільного зв'язку шостого покоління (5G).

Шляхом імітаційного моделювання системи 5G, що працює за стандартом NR Release-18, проведено детальний аналіз ефективності зниження споживання енергії призначеним для користувача обладнанням за умови використання схеми переривчастого приймання DRX для різних моделей трафіку та найбільш важливого сценарію (Dense Urban Macro) розгортання систем бездротового стільникового мобільного зв'язку 5G у міських умовах.

Аналіз результатів моделювання показав, що схема переривчастого приймання не дає змоги досягти верхньої межі можливого енергоощадного використання для всіх досліджених моделей трафіку через неоптимальний розподіл інтервалів часу різних станів у DRX циклі, і це пов'язано здебільшого з інтервалами в режимі активного стану мобільного пристрою, коли на базовій станції відсутні пакети для цього призначеного для користувача обладнання.

У роботі запропоновано нові методи підвищення енергоефективності призначеного для користувача обладнання, що базуються на адаптації схеми переривчастого приймання до трафіку, що надходить, для конкретного призначеного для користувача обладнання завдяки використанню спеціалізованих сигналів пробудження цього призначеного для користувача обладнання та переведення цього призначеного для користувача обладнання в режим сну.

Ефективність запропонованих алгоритмів енергозбереження користувачького обладнання в системах зв'язку 5G була детально вивчена шляхом імітаційного моделювання мереж бездротового зв'язку стандарту NR Release 18 на системному рівні. Аналіз результатів моделювання засвідчив, що запропоновані способи адаптації схеми переривчастого приймання до трафіку, що надходить, дають значний виграш в енергозбереженні до 70% для моделей трафіку обміну миттєвими повідомленнями та перегляду веб-сторінок, які забезпечують низьке завантаження частотно-часових ресурсів системи зв'язку.

Застосування сигналу переходу призначеного для користувача обладнання в режим сну призводить до стабільного зниження середнього споживання енергії мобільним пристроєм за один слот часу з незначним зменшенням виграшу в енергоефективності призначеного для користувача обладнання до 60% та 50% для випадків із середнім та високим навантаженням частотно-тимчасових ресурсів, відповідно.

Запропоновані методи енергозбереження призначеного для користувача обладнання було рекомендовано до використання в системах зв'язку 5G та впроваджено до стандарту систем зв'язку шостого покоління, починаючи з релізів NR Release-17 (сигнал пробудження призначеного для користувача обладнання) та NR Release-18 (сигнал переведення призначеного для користувача обладнання в режим сну).

## 3 ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ 5G NR

### 3.1 Методи зниження порога завадостійкості мобільних систем зв'язку 5G

У NR Release-15 було успадковано схему повторення передачі з LTE. Таким чином, кількість слотів для повторення передачі по PUSCH каналу може становити два, чотири або вісім. Потім, у NR Release-16 було додано можливість динамічної індикації кількості повторень у блоці контрольної інформації для висхідного каналу зв'язку. Крім того, максимальну кількість повторень було збільшено до 16 повторень, а в NR Release-17 до 32 повторень.

Для подальшого зниження порога завадостійкості, особливо при розгляді дуплексного передавання з тимчасовим поділом передач по висхідній і низхідній лініях зв'язку, тобто такої, що має обмежену кількість послідовних слотів для передавання висхідним каналом зв'язку, у NR Release-17 було додано можливість передавання повторень за непослідовними серіями слотів, що є основною відмінністю схеми повторення передавання в стандарті NR від аналогічної схеми в стандарті LTE.

На межі стільники мобільних систем зв'язку оцінка каналу має значний вплив на продуктивність передавання, і тому способи поліпшення якості оцінки каналу є першочерговими під час вивчення методів зниження порога завадостійкості мобільних систем зв'язку 5G.

У першому релізі стандарту NR (NR Release-15), оцінка каналу для демодуляції даних кожного слота заснована на символах DM-RS у слоті. Таким чином, один зі способів підвищити точність оцінки каналу - забезпечити можливість для приймача спільно обробляти символи DM-RS з декількох слотів. Для цієї мети передавач повинен узгоджено передавати символи DM-RS протягом декількох слотів, повторень передачі, тобто передавач повинен підтримувати безперервність фази між символами DM-RS протягом послідовних слотів.

Також, можливість спільної обробки опорних сигналів демодуляції дає змогу поліпшити оцінку зміщення несучої частоти на UE, оскільки цю процедуру також можна здійснювати, використовуючи символи DM-RS [20].

Як і в бездротових системах мобільного стільникового зв'язку четвертого покоління, передавання низхідним і висхідним каналами зв'язку в 5G групуються в кадри, що дорівнюють 10 мс, кожен з яких складається з десяти субкадрів. Водночас, на відміну від систем зв'язку 4G LTE, де мінімальним часовим інтервалом є субкадр, що дорівнює 1 мс, у системах зв'язку шостого покоління стандарту NR мінімальним часовим інтервалом є слот, що є меншим за субкадр у визначену кількість разів, яка визначається так званою нумерологією, сконфігурованою для певного UE. Як показано в таблиці 3.1, кожній нумерології відповідає певна відстань між піднесучими частотами (subcarrier spacing, SCS).

Таблиця 3.1 - Нумерології, підтримувані в стандарті NR

|   | <b>Відстань між піднесучими <math>\Delta f = 2M5</math>, кГц</b> |
|---|------------------------------------------------------------------|
| 0 | 15                                                               |
| 1 | 30                                                               |
| 2 | 60                                                               |
| 3 | 120                                                              |
| 4 | 240                                                              |
| 5 | 480                                                              |
| 6 | 960                                                              |

Таким чином, кількість слотів в одному субкадрі, тобто в 1 мс, можна обчислити, використовуючи індекс нумерології, і дорівнює  $2^{\mu}$ .

Унаслідок підтримки декількох нумерологій у стандарті NR стандартне перемикання частоти виконується всередині слота і між слотами, на відміну від LTE, де перемикання частоти виконується всередині субкадра і між субкадрами, як було описано в [21].

Як можна бачити з рисунку 3.1а, за стандартного розподілу частотно-часових ресурсів під час міжслотового перемикання частот, тобто під час перебудови частоти після кожного повторення, використання міжслотового

спільного оцінювання каналу неможливе через відсутність послідовних слотів з єдиною ресурсною алокацією для об'єднання опорних сигналів демодуляції.

На рисунку 3.1б показано приклад спеціалізованого шаблону перемикавання частот між слотами, запропонованого в патентах [10, 11], зі збереженням ресурсної алокації впродовж двох послідовних слотів, що дає змогу в разі збереження безперервності фази між символами DM-RS використовувати для них спільну оцінку каналу зв'язку.

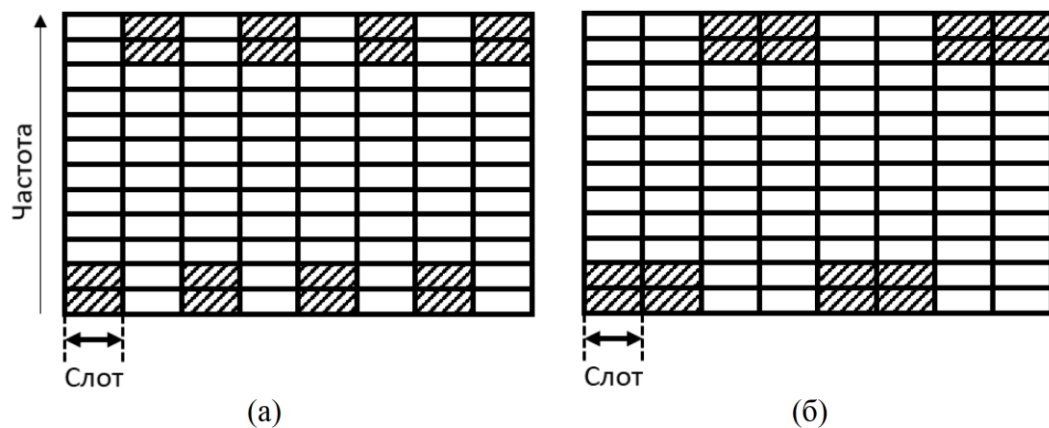


Рисунок 3.1 – Приклад розподілу частотно-часових ресурсів під час міжслотового перемикавання частот: а - стандартний розподіл у NR Release-15, б - розподіл ресурсів для об'єднання DM-RS символів

Через необхідність використання однієї ресурсної алокації для всіх слотів при використанні схеми повторення передачі, а також через відсутність вимоги в стандартах LTE і NR до забезпечення безперервності фази символів DM-RS між слотами, схему повторного передавання не можна використати одночасно з міжслотовим перемиканням частоти з об'єднанням опорних сигналів демодуляції для спільного оцінювання каналу, що є основним недоліком схеми повторного передавання та однією з переваг схеми, описаної в [13].

Під час оцінювання порога завадостійкості системи зв'язку здійснюють пошук найгіршого сценарію, тобто сценарію з найнижчим відношенням сигнал-шум (ВШ), який зазвичай реалізують для користувачів, розташованих на

кордоні стільники системи мобільного зв'язку. Водночас для всіх користувачів стільникового зв'язку має бути забезпечена певна якість обслуговування (quality of service, QoS), що включає верхню межу на максимальну затримку передавання пакетів для кожного користувача окремо та на загальну здатність системи обслуговувати певну кількість користувачів, для яких виконано умову обмеження згори на затримку під час передавання пакета даних.

Для сценарію з найнижчим відношенням сигнал-шум, розміру одного блоку частотно-тимчасових ресурсів (Physical Resource Block, PRB) недостатньо для успішного передавання пакета за один слот, тобто з досить низькою швидкістю кодування і модуляцією. Це виконується навіть за малого розміру пакета, наприклад для голосового зв'язку. У цьому випадку в системах зв'язку стандарту LTE і першого релізу стандарту NR існує низка методів, які можуть бути використані базовою станцією для планування прийому пакетів від користувачів:

1. Поділ пакета даних на більш дрібні частини з подальшою передачею кожної частини окремо.
2. Використання гібридної схеми повторного передавання з автоматичним запитом (HARQ) для повторного передавання пакета в разі неуспішності приймання. Ця схема дає змогу знижувати швидкість кодування під час кожного повторення передавання, що збільшує ймовірність успішного декодування.
3. Використання схеми повторення передачі, описаної в [14].

При використанні першого підходу кожна частина пакета передається з більш низькою кодовою швидкістю і модуляцією, ніж під час передавання повного пакета, що призводить до більш високої ймовірності успішного передавання. Основним недоліком цього підходу є збільшення накладних витрат на більш високих рівнях стека системи зв'язку через необхідність додавати заголовки до кожної з прийнятих частин на кожному з високих рівнів. Водночас додатковим джерелом збільшення накладних витрат також є послідовність циклічного надлишкового коду (cyclic redundancy check, CRC), яку додають на фізичному рівні до кожної з частин пакету даних для перевірки успішності

передачі. Крім того, цей підхід не гарантує певну затримку в передачі цілого пакета через необхідну затримку між передачами окремих частин пакета за умови завантаження каналу зв'язку.

Другий підхід, тобто використання схеми HARQ, також не гарантує певної затримки в передачі пакета користувачеві через затримку перед повторною передачею пакета, що складається із затримок запиту повторної передачі та планування повторної передачі.

Третій підхід, тобто використання схеми повторного передавання, може гарантувати затримку передавання пакета, але також має недоліки, описані в [15].

Підсумовуючи вищесказане, з погляду пропускнуєї спроможності стільникового зв'язку, коли базова станція обслуговує велику кількість користувачів на кордоні стільникового зв'язку, перераховані підходи значно обмежують кількість користувачів, для яких може бути забезпечено необхідну якість обслуговування.

Новий тип передачі даних висхідним каналом зв'язку Новий, четвертий, підхід до передачі даних каналом PUSCH у поганих умовах каналу реалізується шляхом мультислотової передачі. Ця схема введена в стандарт мереж зв'язку 5G, починаючи з NR Release-17, і заснована на охопленні блоком даних, що передається, декількох слотів (transport block spanning over multiple slots, TBoMS) для забезпечення досить низьких швидкості кодування і модуляції, дозволяючи при цьому більш ефективно використовувати обмежену потужність передавача UE.

Під час використання цієї схеми частотно-часові ресурси всіх слотів, сконфігурованих для передавання TBoMS, використовуються разом для обчислення розміру переданого блоку даних (transport block size, TBS) на основі швидкості кодування і модуляції, необхідних для успішного передавання пакетів за поточного стану висхідного каналу системи зв'язку. Таким чином, весь пакет кодується для спільної ресурсної алокації всіх слотів, сконфігурованих для передачі TBoMS. Потім у кожному слоті, виділеному для передачі TBoMS,

передається тільки відповідна частина кодової послідовності. Декодування повної кодової послідовності відбувається тільки після отримання всіх слотів.

Новий підхід, як і схема повторення передавання, дає змогу заздалегідь гарантувати певний час передавання пакетів даних шляхом конфігурування необхідної кількості слотів, виділених для передавання TBoMS, і за рахунок відсутності затримок між передаваннями, як у підходах 1 і 2.

Наприклад, під час використання голосового зв'язку UE має передавати 328 біт за 20 мс. Для сценарію з найгіршим станом каналу, для максимального збільшення ВСШ при обмеженій потужності передавача на UE проводиться максимізація спектральної густини потужності завдяки виділенню мінімальної ресурсної алокації для передавання в слоті, що дорівнює одному ресурсному блоку.

Використовуючи таку ресурсну алокацію, неможливо передати повний пакет 328 біт за один слот з досить низькою модуляцією (BPSK або QPSK) через неприпустиму швидкість кодування, тобто більшу за 0,95. Водночас, використовуючи схему TBoMS або схему повторення передавання, наприклад, шляхом конфігурування чотирьох слотів для передавання TBoMS, такий пакет даних може бути передано з використанням QPSK модуляції та з низькою швидкістю кодування близько 30%.

Відмінність від схеми повторної передачі Головною відмінністю схеми TBoMS є змінена схема вибору біт (bit selection) з циклічного буфера LDPC кодів для операції узгодження швидкості кодування (rate matching).

Як описано в [16], у стандартній схемі узгодження швидкості кодування кодів з малою щільністю перевірки на парність у стандарті зв'язку NR кожному повторенню передавання відповідає свій індекс версії надмірності (redundancy version, RV). Це означає, що для кожного повторення передачі вибір біт із циклічного буфера починається з фіксованої позиції, визначеної в стандарті NR, незалежної від вибору біт для інших повторень передачі.

Варто також врахувати, що позиції версій надмірності розподілені нерівномірно по циклічному буферу так, щоб початок останньої, під номером 3,

[illegible]

Рисунок 3.2 – Матриця LDPC зі стандарту NR

Таким чином, на рисунку 3.2 під час запису матриці LDPC клітинка з числом відповідає підматриці, отриманій з одиничної матриці, циклічно зсунутої на це

число. Порожні комірки відповідають нульовим підматрицям. Жовтим кольором виділено приклад ортогональних рядків, тобто таких рядків, у яких ненульові підматриці одного рядка розміщені в стовпчиках, що відрізняються від стовпчиків, у яких розміщені ненульові підматриці іншого рядка.

Як можна помітити з прикладу матриць LDPC на рисунку 3.2, щільність ненульових підматриць у рядку незмінна для матриці A і спадає при русі вниз по матриці D. Причому максимальна щільність спостерігається в матриці A. Таким чином, можна розділити біти кодової послідовності за кількістю інформації, яку вони містять про інші біти після операції кодування, тобто створити оптимальний порядок передачі біт кодової послідовності.

Над матрицею на прикладі з рисунку 3.2 розташовано вектор кодової послідовності, що відповідає мінімальній швидкості кодування LDPC матриці. За відповідністю частин кодової послідовності та частин матриці LDPC видно, що матриці A і B беруть участь при обчисленні першої групи перевірочних біт (П1), а матриці D і E беруть участь у побудові другої групи (П2). Таким чином, оптимальним для кодової послідовності є прямий порядок передачі біт:

1. Систематичні біти, що несуть рівну (максимальну) кількість інформації.
2. Перевірочні біти першої групи, що також несуть рівну між собою кількість інформації.
3. Перевірочні біти другої групи, що несуть кількість інформації, яка зменшується під час руху до кінця кодової послідовності.

За отриманим принципом черговості передачі біт кодової послідовності LDPC кодів було сформовано процедуру вибору біт для операції узгодження швидкості кодування передачі за схемою TBoMS.

Оскільки матриці LDPC у стандарті NR спроектовано для певного кінцевого набору розмірів підматриць, для деяких розмірів пакета даних може виконуватися така умова:

$$K_b \cdot Z \neq K, \forall Z, \quad (3.1)$$

де  $K_b$  - кількість стовпців матриці  $A$  (систематичних стовпців);  $Z$  - розмір підматриці;  $K$  - розмір пакета даних.

У такому разі, розміром підматриці обирається мінімальне значення, для якого виконується умова:

$$K_b \cdot Z \geq K. \quad (3.2)$$

Далі до пакета даних додається  $K_b \cdot Z - K$  біт рівних нулю, що називаються бітами заповнення (filler bits). Ці біти пропускаються під час процедури вибору біт для передачі.

Таким чином, індекс  $s_n$  початкового біта в циклічному буфері для  $n$ -го слота, сконфігурованого для TBoMS передачі, обчислюється як:

$$s_n = \begin{cases} k_0, & n = 0 \\ (s_{n-1} + H + \tau_{n-1}) \bmod N_{cb}, & n = 1, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (3.3)$$

де  $k_0$  - індекс початкового біта для версії надмірності, сконфігурованої для TBoMS передавання;  $N_{cb}$  - довжина циклічного буфера;  $H$  - загальна кількість кодованих бітів, доступних для передавання в слоті, виділеному для TBoMS;  $\tau_{n-1}$  - кількість бітів заповнення, пропущених під час вибору біт для попереднього слота, якщо такі є;  $N$  - кількість слотів, сконфігурованих для TBoMS передавання.

Процедура обчислення початкового біта в циклічному буфері для  $n$ -го слота, сконфігурованого для TBoMS передавання, зображена на рисунку 3.3.

Для аналізу виграшу схеми TBoMS у зниженні ймовірності блокової помилки завдяки зміні алгоритму процедури узгодження швидкості кодування порівняно зі схемою повторення передавання на рисунку 3.4 і рисунку 3.5 показано якісні приклади процедури вибору біт за середньої швидкості кодування і низької швидкості кодування відповідно.



частини кодових біт за високих і середніх швидкостей кодування, а також призводить до часткового перекриття обраних біт між передаваннями.

### 3.2 3GPP моделі каналу зв'язку для моделювання бездротових мобільних систем зв'язку на фізичному рівні

Для моделювання бездротових мобільних систем зв'язку на фізичному рівні використовуються дві групи моделей каналу зв'язку, розроблених консорціумом 3GPP:

1. Групу моделей каналу зв'язку Clustered Delay Line (CDL) використовують для моделювання каналу, коли прийнятий сигнал складається з декількох кластерів із різними затримками - кожен кластер містить багатопроменеві компоненти з однаковою затримкою, але з незначними відмінностями в кутах відправлення і прибуття.

2. Група спрощених моделей каналу зв'язку Tapped Delay Line (TDL), де кожна модель розроблена під певний сценарій. Ці моделі можуть бути використані в разі «спрощеної» симуляції фізичного рівня мобільних систем зв'язку без моделювання MIMO антенних решіток. TDL модель каналу зв'язку - це багатопроменева модель, у якій для кожного променя специфіковано затримку і потужність для подальшої генерації випадкового числа за заданим розподілом.

Три моделі TDL, а саме TDL-A, TDL-B і TDL-C, побудовані для представлення трьох різних профілів каналів із поширенням хвилі від джерела, яке перебуває поза прямою видимістю (non-line-of-sight, NLOS), тоді як TDL-D і TDL-E побудовані для LOS (line-of-sight) сценарію, тобто для випадку, коли джерело хвилі (передавач) перебуває у прямій видимості приймача.

### 3.3 Результати комп'ютерного моделювання

Ефективність і вигаш від використання описаних схем зниження порога завадостійкості систем бездротового зв'язку 5G було перевірено шляхом комп'ютерного моделювання на симуляторі фізичного рівня, заснованого на стандарті NR Release-17 [6, 13-15]. Моделювання висхідного каналу зв'язку проводили з використанням TDL-C моделі каналу зв'язку в частотному діапазоні 1 для заміського і міського сценаріїв із несучими частотами 700 МГц і 4 ГГц, відповідно. Для імітації найгіршого сценарію стану каналу зв'язку використовували мінімальні розміри ресурсних алокацій, тобто один ресурсний блок для схеми TBoMS і чотири ресурсні блоки для однослотового передавання каналом PUSCH.

Аналіз схеми повторення передавання На рисунку 3.6 показано приклад залежності ймовірності блокової помилки від ВСШ для різної кількості повторень передавання для сільського сценарію з несучою частотою 700 МГц. Під час моделювання використовувався метод перемикавання частоти всередині слота.

Як можна помітити з цього прикладу, у разі збільшення кількості повторних передач сповільнюється зниження порога ймовірності блокової помилки, що дорівнює 10%, що пояснюється погіршенням якості оцінювання каналу під час руху в бік зниження ВСШ.

Аналіз схеми перемикавання частоти На рисунках 3.7 і 3.8 показано порівняння ефективності в зниженні ймовірності блокової помилки схеми перемикавання частоти між слотами за різної кількості використовуваних ресурсних алокацій. На цих рисунках криві ймовірності блокової помилки для двох і чотирьох ресурсних алокацій підписані як  $N_a = 2$  і  $N_a = 4$ , відповідно. З порівнянь видно, що збільшення кількості ресурсних алокацій із двох до чотирьох забезпечує значний вигаш у зниженні порога завадостійкості близько 1-2 дБ.

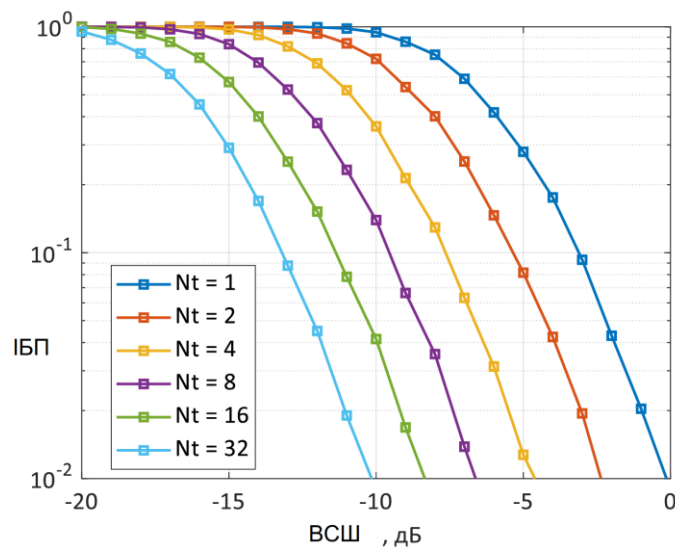


Рисунок 3.6 – Порівняння виграшу в продуктивності при використанні схеми повторення передачі для різної кількості повторень

Для аналізу ефективності схеми мультислотового передавання даних, TBoMS, для обох сценаріїв, перелічених у [22], було проведено порівняння таких конфігурацій:

1. Однослотове передавання каналом PUSCH із чотирма ресурсними блоками, виділеними для передавання в слоті.
2. Передача TBoMS із чотирма сконфігурованими слотами й одним ресурсним блоком, виділеним у кожному слоті.
3. Передавання TBoMS із чотирма сконфігурованими слотами й одним ресурсним блоком, виділеним у кожному слоті. Крім того, використовується стандартна схема міжслотової перебудови частоти з двома ресурсними алокаціями.
4. Передавання TBoMS із чотирма сконфігурованими слотами й одним ресурсним блоком, виділеним у кожному слоті. Крім того, використовується міжслотова перебудова частоти з двома частотними алокаціями і міжслотовим перемиканням частоти з об'єднанням опорних сигналів демодуляції для спільної оцінки каналу для об'єднаних пар слотів, як показано на рисунку 3.1б.

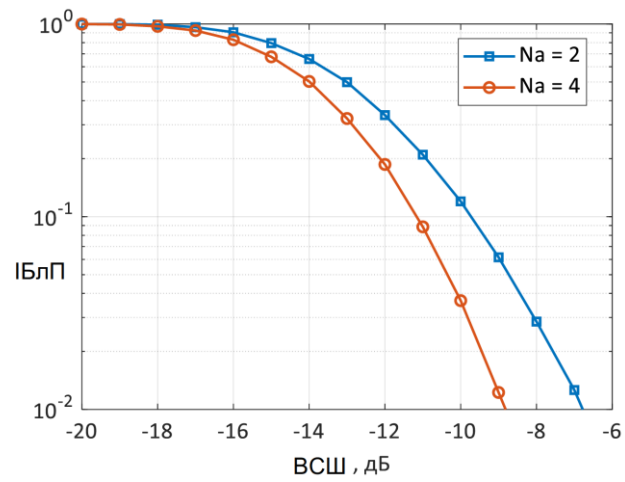


Рисунок 3.7 – Порівняння продуктивності схеми перемикання частоти між слотами за різної кількості використовуваних алокацій для сценарію Rural 700 МГц

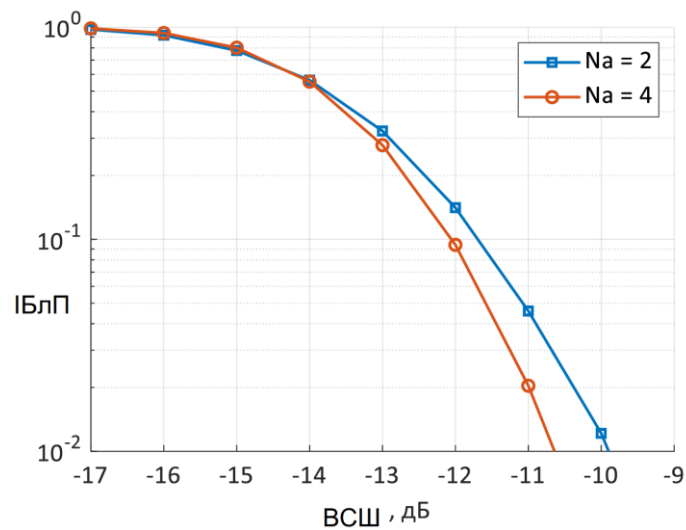


Рисунок 3.8 – Порівняння продуктивності схеми перемикання частоти між слотами за різної кількості використовуваних алокацій для сценарію Urban 4 ГГц

На рисунках 3.9 і 3.10 представлено порівняння залежностей ймовірностей блокової помилки від ВСШ для описаних конфігурацій під час моделювання міського і сільського сценаріїв, відповідно.

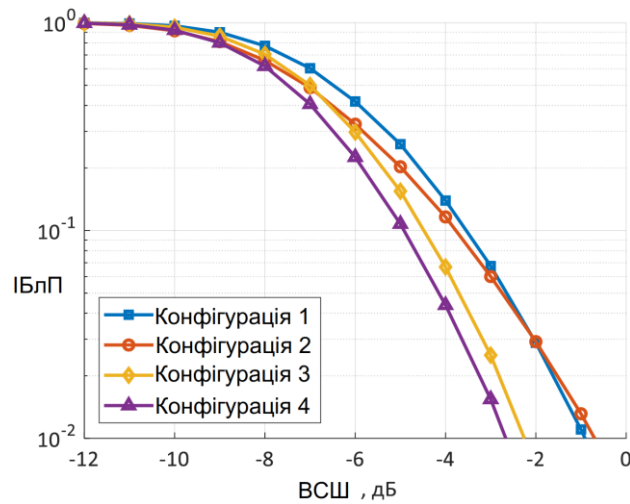


Рисунок 3.9 – Порівняння BLER для сценарію Urban 4 ГГц

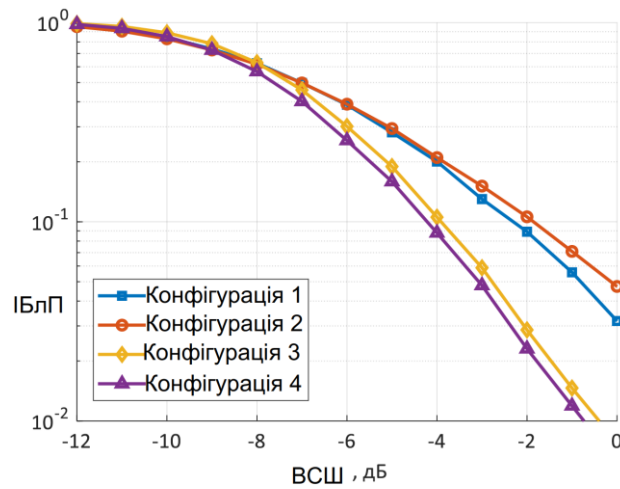


Рисунок 3.10 – Порівняння BLER для сценарію Rural 700 МГц

Порівнюючи криві для конфігурацій 2 і 3, можна бачити, що перебудова частоти забезпечує значне зниження порога завадостійкості приблизно на 2 дБ. Порівнюючи криві для конфігурацій 3 і 4, можна бачити, що використання поліпшеної схеми перебудови частоти між слотами дає додаткове зниження порога завадостійкості приблизно на 0,5 дБ завдяки використанню об'єднання символів DM-RS для спільної оцінки каналу.

На рисунку 3.11 показано приклад виграшу в зниження порога завадостійкості завдяки використанню поліпшеної схеми узгодження швидкості

кодування для TBoMS передавання. Було проведено порівняння зі стандартною схемою повторення передавання для сценарію Rural 700 МГц, але з додатковими розмірами переданого блоку даних (TBS), що дорівнюють 528 біт і 704 біт, тобто для середніх швидкостей кодування (MCS 6 і MCS 8 з [15]).

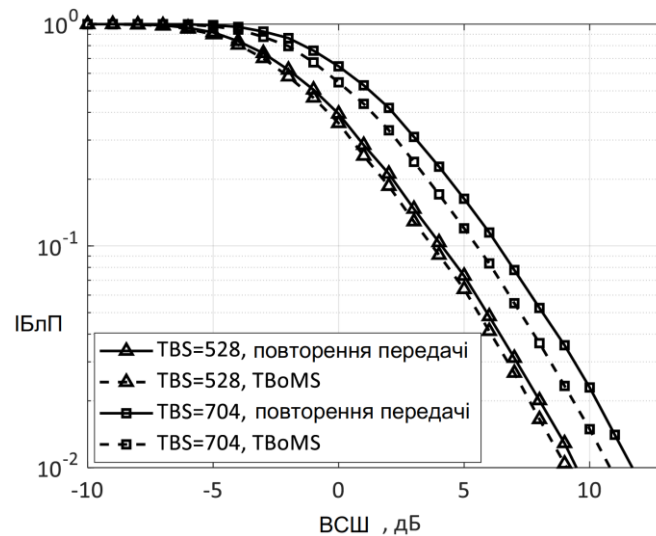


Рисунок 3.11 – Порівняння продуктивності TBoMS зі стандартною схемою повторення передачі

Як видно з прикладу на рисунку 3.11, виграш у зниженні BLER завдяки використанню поліпшеної схеми вибору біт для операції узгодження швидкості кодування може досягати приблизно 1 дБ.

### 3.4 Висновки до розділу 3

У Розділі 3 було розглянуто завдання зниження порога завадостійкості систем бездротового мобільного зв'язку. Представлено методи для зменшення ймовірності блокової помилки користувацького обладнання на межі комірки систем стільникового зв'язку 5G, тобто для сценарію поганого стану каналу. Зокрема, було представлено новий тип мультислотового передавання даних

висхідним каналом зв'язку систем 5G, що має низку відмінностей і поліпшень щодо схеми повторення передавання.

Також були розглянуті: схема перебудови частоти всередині слота і між слотами в 5G і метод спільної оцінки каналу з міжслотовим об'єднанням опорних сигналів демодуляції.

Ефективність у зниженні порога завадостійкості шляхом використання запропонованих алгоритмів у системах зв'язку 5G була вивчена шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання бездротових мереж зв'язку на фізичному рівні. З отриманих результатів видно, що перебудова частоти забезпечує значне зниження порога завадостійкості. Також показано, що збільшення кількості ресурсних алокацій з двох до чотирьох забезпечує додатковий вииграш у продуктивності близько 1-2 дБ.

Аналіз ефективності в зниженні порога завадостійкості схеми мультислотового передавання висхідним каналом зв'язку показує, що використання поліпшеної схеми перебудови частоти між слотами дає додаткове зниження ймовірності пакетних помилок приблизно на 0,5 дБ завдяки використанню об'єднання символів DM-RS для спільного оцінювання каналу.

Також було показано, що вииграш у зниженні порога завадостійкості цієї схеми порівняно зі стандартною схемою повторення передавання завдяки використанню поліпшеної схеми вибору біт для операції узгодження швидкості кодування може досягати приблизно 1 дБ.

Схема мультислотового передавання висхідним каналом зв'язку була рекомендована до використання в системах зв'язку 5G і впроваджена в стандарт систем зв'язку шостого покоління, починаючи з релізу NR Release-18.

## 4 МЕТОД АДАПТАЦІЇ ДО НЕЛІНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ ПЕРЕДАНИХ СИГНАЛІВ У СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ ШОСТОГО ПОКОЛІННЯ

### 4.1 Опис системної моделі

Узагальнена структурна схема передавача з квадратурним модулятором показана на рисунку 4.1. У даній моделі системи «ідеальні» компоненти сигналу генеруються в цифровому сигнальному процесорі (Digital signal processor, DSP), трансформуються в аналогові сигнали в цифроаналогових перетворювачах, зсуваються в квадратурному модуляторі на необхідну смугу частот за допомогою синусоїдальних сигналів гетеродина (local oscillator, LO) і після проходження смугових фільтрів (band-pass filter, BPF) і підсумовування надходять в підсилювач потужності (power amplifier, PA).

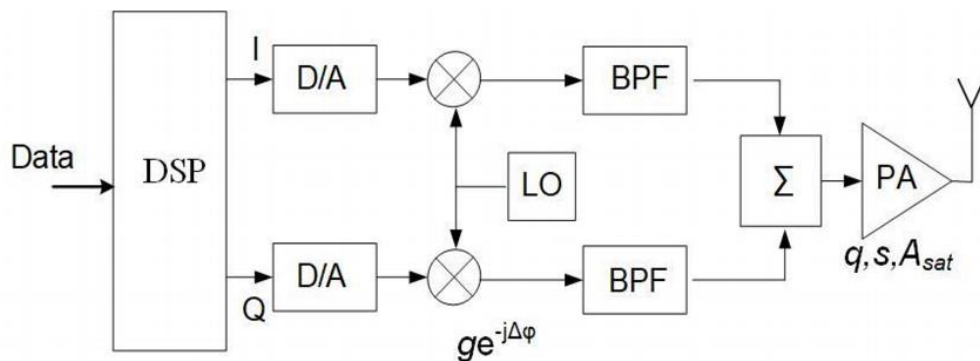


Рисунок 4.1 – Узагальнена структурна схема передавача

Для моделювання спотворень на підсилювачі потужності передавача використовувалася добре відома модель Rapp [16], що описує амплітудні спотворення АМ-АМ таким чином:

$$G(A) = q \frac{A}{\left(1 + \left(\frac{qA}{A_{sat}}\right)^{2s}\right)^{\frac{1}{2s}}}, \quad (4.1)$$

де  $G(A)$  - вихідна амплітуда;  $A$  - середньоквадратична вхідна амплітуда сигналів на підсилювачі потужності у вольтах;  $q$  - малий коефіцієнт посилення сигналу;  $s$  - коефіцієнт плавності посилення;  $A_{\text{sat}}$  - рівень насичення. На рисунку 4.2 показано серію кривих перетворення АМ-АМ, побудованих із використанням формули (4.1) для різних значень параметра  $s$ ,  $q=1$  і  $A_{\text{sat}}=1$ .

Можна бачити, що коефіцієнт плавності  $s$  керує різкістю переходу в область насичення. При збільшенні цього параметра криві АМ-АМ наближаються до характеристики ідеального лінійного підсилювача з обмеженням на рівні  $A_{\text{sat}}$ .

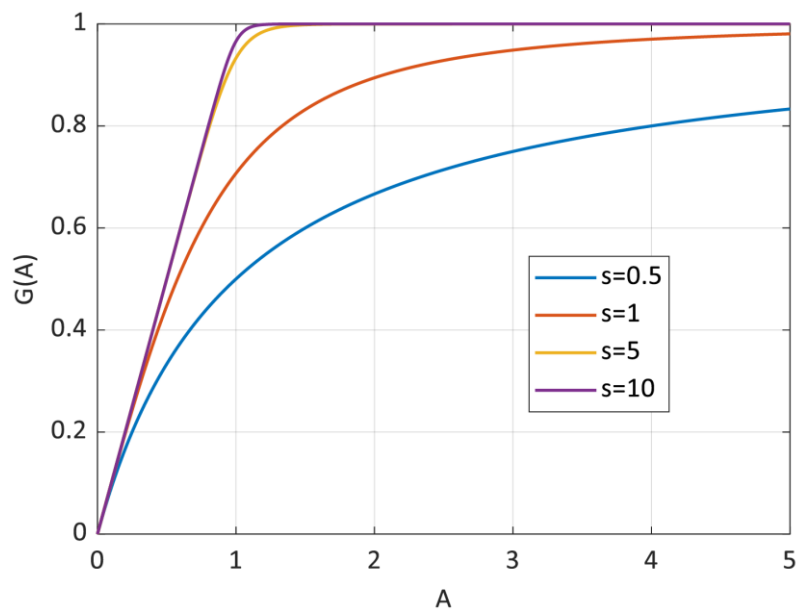


Рисунок 4.2 – Криві АМ-АМ для моделі  $R_{\text{app}}$

У роботі не враховуються нелінійні фазові спотворення АМ-РМ, оскільки їхній вплив значно менший, ніж спотворення АМ-АМ для більшості реальних радіочастотних пристроїв.

Для моделювання дисбалансу I/Q компонент було використано модель, представлену в документах з методології оцінювання стандартів IEEE 802.11ad [17] та IEEE 802.11ay [18]:

$$y_d(t) = \mu y(t) + \nu y^*(t), \quad (4.2)$$

де  $y(t)$  - ідеальний комплексний сигнал передавання;  $y_d(t)$  - спотворений комплексний сигнал з урахуванням дисбалансу I/Q компонент. Також для зручності аналізу далі припускається, що загальний дисбаланс між компонентами I і Q (див. рисунок 4.1) виникає через відхилення амплітуди сигналу від одиниці  $g \neq 1$  і зміщення фази  $\Delta\varphi \neq 0$  сигналу гетеродина лише у квадратурній компоненті. У цьому разі, якщо ми уявимо ідеальний комплексний передаваний сигнал  $y(t)$  у вигляді квадратурних складових  $A_c(t)$  і  $A_s(t)$ :

$$y(t) = A_c(t) + jA_s(t). \quad (4.3)$$

Тоді спотворений комплексний сигнал (4.2) може бути записаний у вигляді:

$$y_d(t) = A_c(t) + jge^{-j\Delta\varphi} A_s(t). \quad (4.4)$$

Прості маніпуляції з формулами 4.2 і 4.4 показують, що коефіцієнти  $\mu$  і  $\nu$  у формулі 4.4 виражаються як:

$$\mu = \frac{1+ge^{j\Delta\varphi}}{2}, \quad (4.5)$$

$$\nu = \frac{1-ge^{j\Delta\varphi}}{2}. \quad (4.6)$$

Для  $g = 1$  і  $\Delta\varphi = 0$  ми маємо ідеальний модулятор з  $\mu = 1$  і  $\nu = 0$ . Очевидно, що асиметричне введення дисбалансу тільки в одній квадратурній компоненті не зменшує спільності використовуваної моделі, оскільки на характеристики системи впливає тільки різниця між компонентами I і Q, а не абсолютні значення.

На рисунках 4.3 і 4.4 наведено діаграми розсіювання прийнятого 16QAM-сигналу, які ілюструють приклади впливу таких спотворень, як дисбаланс I/Q

компонент сигналу і нелінійність підсилювача потужності, відповідно, в припущенні, що лінійне мале посилення сигналу дорівнює одиниці ( $q = 1$ ).

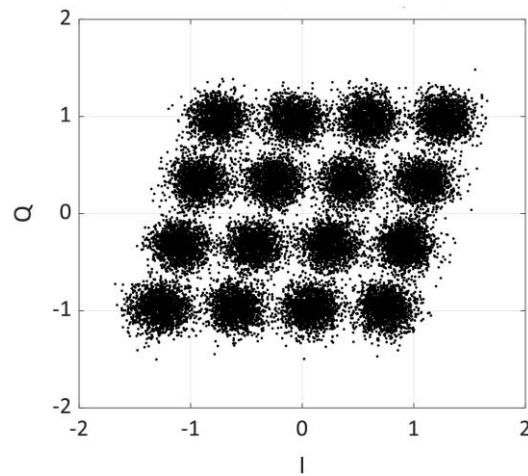


Рисунок 4.3 – Ілюстрація впливу дисбалансу I/Q компонент на діаграму розсіювання сигналу 16QAM зі зсувом фази 30 градусів за ВСШ = 15 дБ

Діаграма розсіювання для спотвореного сигналу з модуляцією 16QAM показана на рисунку 4.4 для відношення рівня насичення  $A_{\text{sat}}$  до ефективної амплітуди  $A_{\text{eff}}$  вхідного сигналу на підсилювачі потужності  $\text{Sat} = A_{\text{sat}} / A_{\text{eff}} = 1$ .

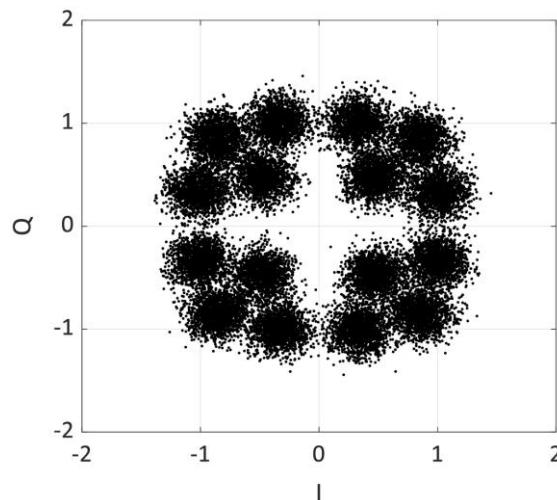


Рисунок 4.4 – Ілюстрація впливу нелінійності підсилювача потужності на діаграму розсіювання сигналу 16QAM для рівня насичення  $\text{Sat} = 1$  за ВСШ = 15 дБ

## 4.2 Загальний підхід до компенсації спотворень передавача на стороні приймача

Пропонований підхід [19, 20] до компенсації спотворень, що виникають на передавачі, на стороні приймача містить у собі дві основні операції. По-перше, параметри сумарних лінійних (I/Q дисбаланс) і нелінійних (в підсилювачі потужності) спотворень сигналу, викликаних неідеальною роботою блоків передавача, оцінюються шляхом статистичного аналізу розподілів комплексних амплітуд сигналу. По-друге, «м'які» метрики (LLR, Log-Likelihood Ratio), що використовуються в декодері (LDPC), обчислюються під час демодуляції сигналів з урахуванням коригування опорного модуляційного сузір'я.

Статистична оцінка спотворень через дисбаланс I/Q компонент і нелінійності підсилювача потужності проводилася на основі побудови діаграм розсіювання отриманих комплексних амплітуд QAM сигналів, приклади яких наведено на рисунках 4.3 і 4.4.

Покроковий опис етапів обробки сигналів у радіоприймачі для компенсації спотворень у радіопередавачі наведено нижче:

1. Використовуючи апріорне знання структури модуляційного сузір'я (наприклад, 16QAM-сузір'я), у комплексній області сигналу, що приймається, створюють однорідну двовимірну сітку з осередків досить малого розміру. Шляхом тестування запропонованого алгоритму виявлено, що розмір елементарних осередків має становити не більше 0.05 від максимальної амплітуди сигналу.

2. Для кожного осередку створеної двовимірної сітки обчислюють кількість символів прийнятого модульованого сигналу, що потрапляють в область цього осередку.

3. Проводиться обробка отриманого двовимірного масиву лічильника символів (гістограм) прийнятого модульованого сигналу, що потрапляють в області осередків, шляхом двовимірної фільтрації з гауссовським ядром. Ця обробка аналогічна двовимірній обробці зображень для боротьби із

зашумленістю або після його стиснення. Після двовимірної фільтрації вихідних даних проводять пошук локальних максимумів, які потім використовують як нові точки опорного модуляційного сузір'я. Під час практичної реалізації двовимірної фільтрації радіус вікна для гауссівського фільтра підбирався шляхом декількох послідовних циклів оброблення за критерієм збігу кількості отриманих максимумів із кількістю точок у модуляційному сузір'ї сигналу, що приймається (наприклад, до 16 точок для 16QAM модуляції).

4. Координати точок, що відповідають локальним максимумам отриманого двовимірного масиву, використовують як опорні в процесі демодуляції прийнятих сигналів під час обчислення евклідових відстаней в алгоритмах демодуляції сигналів для точнішого обчислення «м'яких» LLR-метрик (для кожного прийнятого біта), що подаються на LDPC-декодер приймача.

Приклади гістограм сигналів, що приймаються, з модуляцією 16QAM, отримані до і після застосування двовимірної гауссовської фільтрації, показано на рисунках 4.5а і 4.5б, відповідно.

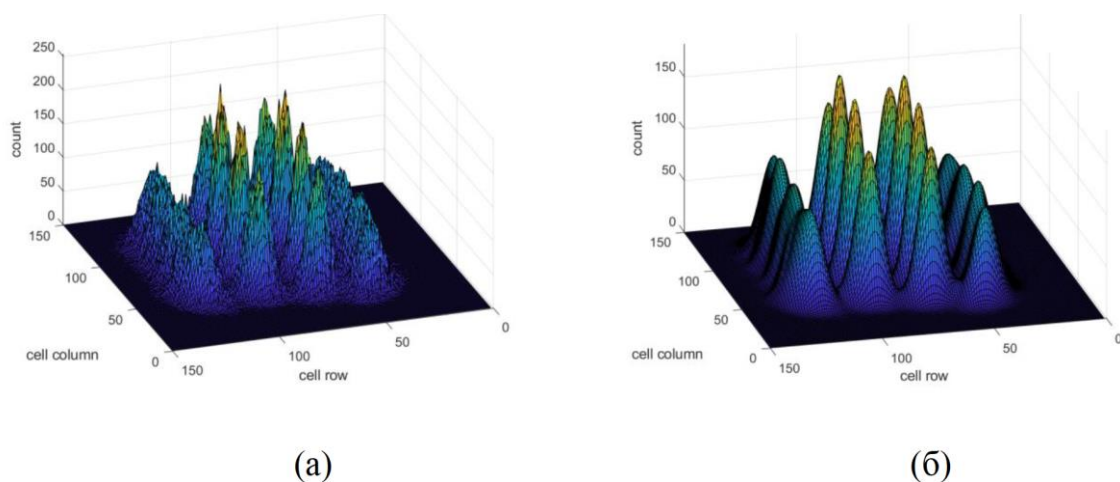


Рисунок 4.5 – Гістограми модульованих сигналів до (а) і після (б) застосування двовимірної гаусівської фільтрації

Ефективність запропонованого адаптивного алгоритму демодуляції та декодування з компенсацією в радіоприймачі лінійних і нелінійних спотворень

сигналів передавачем перевірили шляхом опрацювання кількох серій експериментальних вимірювань характеристик створеного прототипу приймально-передавального обладнання [20]. Найефективнішим виявилось застосування цього алгоритму для демодуляції та декодування сигналів із модуляцією 16QAM і високою швидкістю кодування 3/4.

Порівняно з відомими схемами попереднього спотворення (попереднього викривлення) сигналів у радіопередавачі пропонується самонавчальний алгоритм демодуляції та декодування в радіоприймачі демонструє значно меншу складність, а тому його можна рекомендувати для застосування в приймально-передавальному устаткуванні невеликих і дешевих релейних станцій.

#### 4.3 Результати комп'ютерного моделювання

Для оцінювання ефективності описаного вище самонавчального алгоритму було створено симулятор фізичного рівня, основні параметри якого наведено в індивідуальному завданні. Для порівняння роботи алгоритму в однакових умовах під час проведення експерименту [10] і під час проведення комп'ютерного імітаційного моделювання до симулятора фізичного рівня додали підтримку матриць LDPC кодів зі стандарту Wi-Fi IEEE 802.11ad, а також модуляції сигнальної хвилі SC-FDE.

Рисунки 4.6, 4.7, 4.8 ілюструють продуктивність розробленого алгоритму шляхом порівняння кривих імовірності блокової помилки (Block Error Rate, BLER) із застосуванням і без застосування схеми компенсації на стороні приймача для модуляції 16QAM і кодової швидкості  $R = 0,75$ . Червоні криві відповідають імовірності блокової помилки у випадку без використання схеми компенсації; зелені криві відповідають імовірності блокової помилки у випадку із застосуванням схеми компенсації.

На рисунку 4.6 представлено результати моделювання для випадку дисбалансу I/Q компонент на стороні передавача. Криві ймовірності блокової помилки показано для трьох значень фазового зсуву  $\Delta\varphi = 30^\circ, 20^\circ, 10^\circ$ . З рисунку

4.6 видно, що самонавчальний алгоритм компенсації спотворень майже ідеально компенсує дисбаланс I/Q компонент для всіх значень зсуву фази.

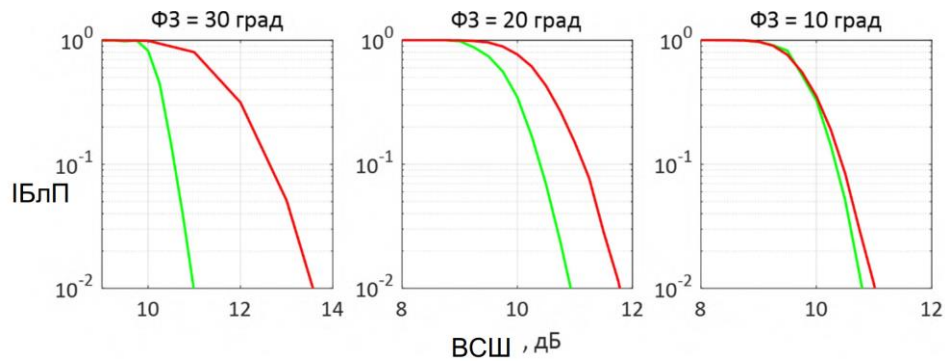


Рисунок 4.6 – Ефективність компенсаційного алгоритму для  $\Delta\varphi = 30^\circ, 20^\circ, 10^\circ$

На рисунку 4.7 подано результати моделювання для випадку нелінійності підсилювача потужності на передавачі. Криві ймовірності блокової помилки показано для коефіцієнта гладкості  $s = 0,5$  (див. рисунок 4.2) і трьох рівнів насичення  $Sat = 1/2, 1$  і  $2$ . З рисунку 4.7 видно, що рівень компенсації спотворень через нелінійність підсилювача потужності не такий високий, як для дисбалансу I/Q компонент.

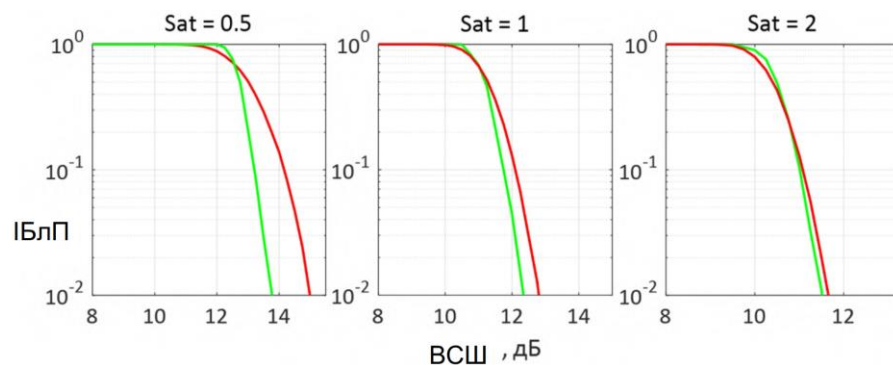


Рисунок 4.7 – Ефективність компенсаційного алгоритму для  $Sat = 0.5, 1$  і  $2$

Це можна пояснити обраною складною для компенсації конфігурацією моделі спотворень підсилювача потужності, тобто коефіцієнтом згладжування  $s = 0,5$ . З цієї причини помітний рівень компенсації, близько 1,3 дБ, спостерігається тільки за низького рівня насичення  $Sat = 0,5$ . Для більш високих рівнів насичення рівень компенсації відносно невеликий: близько 0,6 дБ для  $Sat = 1$  і всього 0,2 дБ для  $Sat = 2$ .

На рисунку 4.8 представлено результати моделювання, коли на стороні передавача присутні обидва типи нелінійних спотворень, тобто як нелінійність на підсилювачі потужності, так і дисбаланс I/Q компонент. Криві ймовірності блокової помилки показано для коефіцієнта гладкості  $s = 0,5$ , трьох значень зсуву фази  $\Delta\phi = 30^\circ, 20^\circ, 10^\circ$  і трьох рівнів насичення  $Sat = 1/2, 1$  і  $2$ , відповідно.

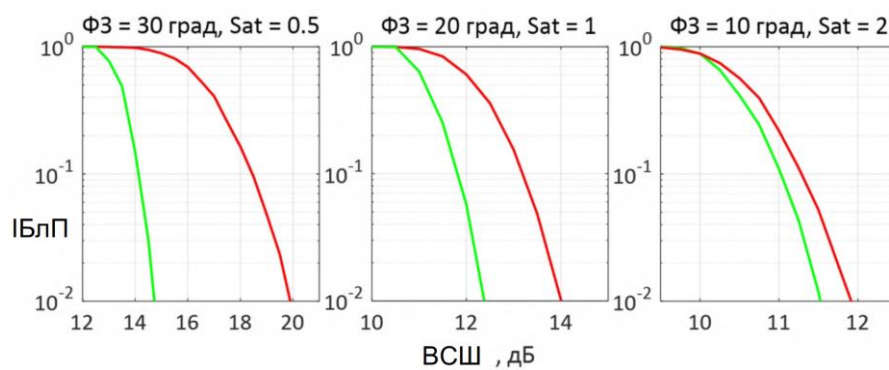


Рисунок 4.8 – Ефективність компенсаційного алгоритму для комбінацій  $\Delta\phi = 30^\circ, Sat = 0,5; \Delta\phi = 20^\circ, Sat = 1; \Delta\phi = 10^\circ, Sat = 2$

З рисунка 4.8 видно, що запропонований алгоритм компенсації демонструє помітне поліпшення продуктивності, приблизно на 5,4 дБ, 1,7 дБ і 0,4 дБ, відповідно, завдяки майже ідеальній компенсації дисбалансу I/Q компонент сигналу в загальному спотворенні.

#### 4.4 Висновки до розділу 4

У Розділі 4 було запропоновано та досліджено новий метод компенсації нелінійних спотворень, що виникають на стороні передавача, шляхом обробки на стороні приймача для систем бездротового зв'язку. Метод ґрунтується на прямому статистичному аналізі прийнятих символів даних для оцінки спотворення та використання цих оцінок у процесі демодуляції та декодування.

Результати моделювання засвідчили, що розроблений самонавчальний алгоритм боротьби з нелійними спотвореннями демонструє дуже хороший рівень компенсації в разі дисбалансу I/Q компонент і потребує подальшого поліпшення продуктивності для випадку, коли на боці передавача також присутня нелінійність підсилювача потужності. Порівняно з відомими схемами попереднього спотворення сигналу, що передається, для компенсації нелінійних спотворень передавача, розроблений алгоритм, що самонавчається, набагато менш складний, а тому його можна використовувати для застосування в мережах Інтернету речей у системах зв'язку 5G, а також у процесі розроблення пристроїв наступних поколінь систем бездротового зв'язку.

## 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 «Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем шостого покоління» 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:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) 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 «Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем шостого покоління» 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 (ПБ, 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                                                                                                                                                                                                | 0                              | 0  | 0  |
| 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                                                                                                                                                                                                                             | 0                              | 60 | 0  |
| 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) | 40                             | 0  | 40 |
| 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                                                                                                                                                                                                                                  | 0                              | 0  | 0  |
| Не нова                                 | Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0                              | 0  | 0  |
| <b>Середнє значення балів експертів</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>46,7</b>                    |    |    |

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                                                                                                                                                                  | 0                                                       | 0  | 0  |
| Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу | 0                                                       | 75 | 0  |
| Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини                                                                                                                         | 60                                                      | 0  | 58 |
| Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо                                                                      | 0                                                       | 0  | 0  |
| Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо                                                                                                    | 0                                                       | 0  | 0  |
| <b>Середнє значення балів експертів</b>                                                                                                                                                            | 64,3                                                    |    |    |

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 [24]:

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

де  $k_{нов}, k_{теор}$  - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи,  $k_{нов} = 46,7, k_{теор} = 64,3$  балів;

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

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 46,7 + 0,4 \cdot 64,33 = 53,73 \text{ балів.}$$

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 «Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем шостого покоління», даний рівень становить 53,73 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 «Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем шостого покоління», 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 [24]:

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

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.

$$Z_o = 18650,00 \cdot 6 / 24 = 4636,38 \text{ грн.}$$

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 (проектний менеджер)      | 18650,00                      | 772,73                      | 6                 | 4636,38                         |
| Інженер-дослідник телекомунікаційних мереж | 17700,00                      | 750,00                      | 24                | 18000,00                        |
| Старший науковий співробітник              | 18000,00                      | 681,82                      | 8                 | 5454,56                         |
| Лаборант                                   | 8200,00                       | 341,67                      | 4                 | 1366,67                         |
| Всього                                     |                               |                             |                   | 29457,61                        |

#### Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $З_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем шостого покоління» розраховуємо за формулою:

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

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  $M_M=8000,00$  грн;

$K_i$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду [24];

$K_c$  – 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.

$$C_1 = 8000,00 \cdot 1,10 \cdot 1,15 / (24 \cdot 8) = 52,71 \text{ грн.}$$

$$3_{pl} = 52,71 \cdot 4,50 = 237,19 \text{ грн.}$$

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 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Установка обладнання для забезпечення моделювання підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем | 4,50                   | 2             | 1,10                | 52,71                         | 237,19                           |
| Підготовка робочого місця інженера-дослідника телекомунікаційних систем                                             | 6,20                   | 2             | 1,10                | 52,71                         | 326,79                           |

продовження таблиці 5.5

|                                                                                                        |      |   |      |       |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---|------|-------|---------|
| Інсталяція програмного забезпечення моделювання завадостійкості                                        | 5,00 | 4 | 1,50 | 71,88 | 359,38  |
| Компіляція програмних блоків поведінки системи                                                         | 5,50 | 5 | 1,70 | 81,46 | 448,02  |
| Налагодження програмних блоків поведінки мобільної системи в умовах поширення завад                    | 7,80 | 4 | 1,50 | 71,88 | 560,63  |
| Формування бази даних поведінки мережі в різних умовах                                                 | 5,00 | 3 | 1,35 | 64,69 | 323,44  |
| Тестування методів підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем шостого покоління | 6,00 | 3 | 1,35 | 64,69 | 388,13  |
| Всього                                                                                                 |      |   |      |       | 2643,56 |

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

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

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

$$Z_{\text{доп}} = (29457,61 + 2643,56) \cdot 12 / 100\% = 3852,14 \text{ грн.}$$

### 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:

$$З_n = (З_o + З_p + З_{доод}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (5.6)$$

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

$$З_n = (29457,61 + 2643,56 + 3852,14) \cdot 22 / 100\% = 7909,73 \text{ грн.}$$

### 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 «Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем шостого покоління».

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:

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

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;

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

$$M_1 = 2,0 \cdot 185,00 \cdot 1,12 - 0 \cdot 0 = 414,40 \text{ грн.}$$

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 |
|------------------------------------------|-------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Офісний папір                            | 185,00            | 2,0              | 0                     | 0                     | 414,40                              |
| Папір для записів                        | 125,00            | 3,0              | 0                     | 0                     | 420,00                              |
| Органайзер офісний                       | 210,00            | 3,0              | 0                     | 0                     | 705,60                              |
| Набір офісного працівника                | 195,00            | 3,0              | 0                     | 0                     | 655,20                              |
| Картридж для принтера                    | 1460,00           | 2,0              | 0                     | 0                     | 3270,40                             |
| Диск оптичний                            | 27,00             | 5,0              | 0                     | 0                     | 151,20                              |
| Flesh-пам'ять 32 GB                      | 139,00            | 2,0              | 0                     | 0                     | 311,36                              |
| Тека для паперів А4                      | 92,00             | 3,0              | 0                     | 0                     | 309,12                              |
| Всього                                   |                   |                  |                       |                       | 6237,28                             |

#### 5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі ( $K_6$ ), які використовують при проведенні НДР на тему «Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем шостого покоління» відсутні.

#### 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. За даною статтею витрати відсутні.

#### 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:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{прог}} \cdot C_{\text{прог.і}} \cdot K_i, \quad (4.8)$$

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

$C_{\text{прог.і}}$  – 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.

$$B_{\text{прз}} = 4630,00 \cdot 1 \cdot 1,12 = 5185,60 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.7 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

| Найменування програмного засобу | Кількість, шт | Ціна за<br>одиницю, грн | Вартість, грн |
|---------------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| Пакет Visual System Simulator   | 1             | 4630,00                 | 5185,60       |
| Пакет Microwave Office          | 1             | 4250,00                 | 4760,00       |
| Пакет MATLAB SIMULINK           | 1             | 4899,00                 | 5486,88       |
| Всього                          |               |                         | 15432,48      |

#### 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:

$$A_{\text{обл}} = \frac{Ц_{\text{б}}}{T_{\text{с}}} \cdot \frac{t_{\text{вик}}}{12}, \quad (5.9)$$

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;

$T_{\text{с}}$  – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{\text{обл}} = (34699,00 \cdot 1) / (3 \cdot 12) = 963,86 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.8 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

| Найменування обладнання                                                                      | Балансова вартість, грн | Строк корисного використання, років | Термін використання обладнання, місяців | Амортизаційні відрахування, грн |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|
| Програмно-аналітичний комплекс дослідження параметрів на базі Ryzen7 PRO 4650GE (11JJ0003UC) | 34699,00                | 3                                   | 1                                       | 963,86                          |
| Графічно-обчислювальний комплекс обробки даних на базі i3-1115G4 (90PT02T2-M07510)           | 32599,00                | 3                                   | 1                                       | 905,53                          |
| Обладнання виводу інформації                                                                 | 6699,00                 | 4                                   | 1                                       | 139,56                          |
| Робоче місце інженера-дослідника спеціалізоване                                              | 8599,00                 | 5                                   | 1                                       | 143,32                          |
| Офісна оргтехніка                                                                            | 8399,00                 | 5                                   | 1                                       | 139,98                          |
| Приміщення лабораторії розробки радіоелектронної апаратури                                   | 485000,00               | 30                                  | 1                                       | 1347,22                         |
| ОС Windows 11                                                                                | 7890,00                 | 3                                   | 1                                       | 219,17                          |
| Прикладний пакет Microsoft Office 2021                                                       | 7120,00                 | 3                                   | 1                                       | 197,78                          |
| Маршрутизатор 62-41BA                                                                        | 6899,00                 | 5                                   | 1                                       | 114,98                          |
| Всього                                                                                       |                         |                                     |                                         | 4171,40                         |

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

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

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (5.10)$$

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), прийmemo  $C_e = 10,98$  грн;

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

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

$$B_e = 0,25 \cdot 190,0 \cdot 10,98 \cdot 0,95 / 0,97 = 521,55 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.9 – Витрати на електроенергію

| Найменування обладнання                                                                      | Встановлена потужність, кВт | Тривалість роботи, год | Сума, грн |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------|
| Програмно-аналітичний комплекс дослідження параметрів на базі Ryzen5 PRO 4650GE (11JJ0003UC) | 0,25                        | 190,0                  | 521,55    |
| Графічно-обчислювальний комплекс обробки даних на базі i5-1115G4 (90PT02T2-M07510)           | 0,32                        | 180,0                  | 632,45    |

продовження таблиці 5.9

|                                                 |      |       |         |
|-------------------------------------------------|------|-------|---------|
| Обладнання виводу інформації                    | 0,16 | 40,0  | 70,27   |
| Робоче місце інженера-дослідника спеціалізоване | 0,10 | 190,0 | 208,62  |
| Офісна оргтехніка                               | 0,42 | 2,4   | 11,11   |
| Маршрутизатор 62-41BA                           | 0,03 | 190,0 | 62,59   |
| Всього                                          |      |       | 1506,59 |

#### 5.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем шостого покоління» 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» відсутні.

#### 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» відсутні.

### 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:

$$I_{\epsilon} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (5.11)$$

де  $H_{ie}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати», приймемо  $H_{ie} = 55\%$ .

$$I_{\epsilon} = (29457,61 + 2643,56) \cdot 55 / 100\% = 17655,64 \text{ грн.}$$

### 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:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.12)$$

де  $H_{нзв}$  – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo  $H_{нзв} = 115\%$ .

$$B_{нзв} = (29457,61 + 2643,56) \cdot 115 / 100\% = 36916,34 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем шостого покоління» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{доо} + Z_n + M + K_v + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (5.13)$$

$$B_{заг} = 29457,61 + 2643,56 + 3852,14 + 7909,73 + 6237,28 + 0,00 + 0,00 + 15432,48 + 4171,40 + 1506,59 + 0,00 + 0,00 + 17655,64 + 36916,34 = 125782,78 \text{ грн.}$$

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

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.14)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo  $\eta = 0,95$ .

$$ЗВ = 125782,78 / 0,95 = 132402,92 \text{ грн.}$$

### 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 «Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем шостого покоління» 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:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (5.15)$$

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

$n$  – 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. Приймемо  $n=2$ ;

$T_c$  – коефіцієнт складності роботи. Приймемо  $T_c=2$ ;

$R$  – 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  $R=1$ . Приймемо  $R=4$ ;

$B$  – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Приймемо  $B=132402,92$  грн;

$t$  – час проведення дослідження. Прийmemo  $t = 0,08$  років, (1 міс.).

Визначення показників  $I, n, T_C, R, B, t$  здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [24].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^2 \cdot 2 \cdot 4 / 132,4 \cdot 0,08 = 11,60.$$

Якщо  $K_p > 1$ , то науково-дослідну роботу на тему «Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем шостого покоління» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

#### 5.4 Висновок до розділу 5

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем шостого покоління» складають 132402,92 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем шостого покоління» 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.

## ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі запропоновано методи й алгоритми підвищення енергоефективності та завадостійкості (зниження ймовірності пакетних помилок) у системах мобільного зв'язку шостого покоління.

Основні результати магістерської кваліфікаційної роботи та впливаючі з них теоретичні та практичні висновки можуть бути сформульовані таким чином:

1. Запропоновано методи адаптації схеми переривчастого приймання для поліпшення енергозбереження призначеного для користувача обладнання в системах зв'язку 5G, які використовують спеціалізовані сигнали пробудження призначеного для користувача обладнання та переходу в режим сну.

2. Ефективність запропонованих алгоритмів було детально вивчено шляхом імітаційного моделювання мереж бездротового зв'язку стандарту NR Release-15 на системному рівні. Аналіз результатів моделювання показав, що запропоновані способи адаптації схеми переривчастого приймання до трафіку, що надходить, дають значний вииграш в енергозбереженні до 70% для моделей трафіку обміну миттєвими повідомленнями та перегляду веб-сторінок, які забезпечують низьке завантаження частотно-часових ресурсів системи зв'язку.

3. Аналіз результатів моделювання показав, що застосування сигналу переходу призначеного для користувача обладнання в режим сну призводить до стабільного зниження середнього споживання енергії мобільним пристроєм за один слот часу з незначним зменшенням виграшу в енергоефективності призначеного для користувача обладнання до 60% та 50% для випадків із середнім та високим завантаженням частотно-часових ресурсів, відповідно.

4. Запропоновані методи енергозбереження призначеного для користувача обладнання було рекомендовано до використання в системах зв'язку 5G та впроваджено до стандарту систем зв'язку шостого покоління, починаючи з релізів NR Release-16 (сигнал пробудження призначеного для користувача обладнання) та NR Release-17 (сигнал переведення призначеного для користувача обладнання в режим сну).

5. Запропоновано нову схему мультислотового передавання даних висхідним каналом зв'язку для зниження порога завадостійкості систем зв'язку шостого покоління стандарту NR.

6. Запропоновано спеціалізований алгоритм вибору біт для операції узгодження швидкості кодування при використанні нового типу мультислотового передавання даних.

7. Запропоновано спеціалізований шаблон міжслотового перемикавання частоти з об'єднанням опорних сигналів демодуляції для поліпшення оцінювання каналу за рахунок спільного міжслотового оброблення.

8. Проведено аналіз ефективності запропонованих методів зниження порога завадостійкості систем зв'язку 5G і зроблено порівняння зі стандартною схемою повторення передачі. Аналіз на фізичному рівні схеми мультислотового передавання висхідним каналом зв'язку показує, що використання поліпшеної схеми перебудови частоти між слотами дає додаткове зниження порога завадостійкості приблизно на 0,5 дБ за рахунок використання об'єднання символів DM-RS для спільного оцінювання каналу. Також було показано, що виграш у зниженні порога завадостійкості цієї схеми порівняно зі стандартною схемою повторення передавання завдяки використанню поліпшеної схеми вибору біт для операції узгодження швидкості кодування може досягати приблизно 1 дБ.

9. Схему мультислотового передавання висхідним каналом зв'язку було рекомендовано до використання в системах зв'язку 5G і впроваджено в стандарт систем зв'язку шостого покоління, починаючи з релізу NR Release-18.

10. Розроблено метод боротьби на стороні приймача з нелінійними спотвореннями, викликаними на передавачі.

11. Проведено аналіз ефективності запропонованого алгоритму на прикладі боротьби зі спотвореннями в підсилювачі потужності та дисбалансом синфазної та квадратурної компонент у модуляторі передавача. Результати моделювання засвідчили, що розроблений самонавчальний алгоритм боротьби з нелінійними спотвореннями демонструє дуже хороший рівень компенсації в разі дисбалансу

I/Q компонент і потребує подальшого поліпшення продуктивності для випадку, коли на боці передавача також присутня нелінійність підсилювача потужності.

12. Порівняно з відомими схемами попереднього спотворення сигналу, що передається, для компенсації нелінійних спотворень передавача, розроблений алгоритм, що самонавчається, набагато менш складний, а тому його можна використовувати для застосування в мережах Інтернету речей у системах зв'язку 5G, а також у процесі розроблення пристроїв наступних поколінь систем бездротового зв'язку.

13. Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем шостого покоління» складають 132402,92 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем шостого покоління» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи , що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. G. Ermolaev, MU-MIMO and CSI Feedback Performance of NR/LTE / B. Mondal, V. Sergeev, A. Sengupta, G. Ermolaev, A. Davydov, E. Kwon, S. Han, A. Papathanassiou // 2019 53rd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS) – 2019 – pp. 1-6 – DOI: 10.1109/CISS.2019.8692922.
2. M. Matin, M. I. Hossain, A New Adaptive Discontinuous Reception (DRX) Model for Power Saving in LTE System // 2019 22nd International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT) – 2019 – pp. 1-6 – DOI: 10.1109/ICCIT48885.2019.9038573.
3. 3GPP, Study on NR coverage enhancements, TR 38.830 // Published by 3rd Generation Partnership Project (3GPP) – 2020.
4. R. D. Mardian, Measuring Quality of Service (QoS) and Quality of Experience (QoE) on 5G Technology: A Review / R. D. Mardian, M. Suryanegara, K. Ramli // 2019 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD) – 2019 – pp. 1-6 – DOI: 10.1109/ICIRD47319.2019.9074681.
5. Z. Guo, 5G NR Uplink Coverage Enhancement Based on DMRS Bundling and Multi-slot Transmission / Z. Guo, D. Chen and Y. Yuan // 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT) – 2020 – pp. 482-486 – DOI: 10.1109/ICCT50939.2020.9295747.
6. G. Koteswara Rao, Enhanced Transport Block Processing for 5G NR PUSCH Coverage Enhancement / G. Koteswara Rao, S. Kumawat, S. Amuru, K. Kuchi // 2021 National Conference on Communications (NCC) – 2021 – pp. 1-6 – DOI: 10.1109/NCC52529.2021.9530122.
7. Y. Song, Adaptive Digital Beamforming for Uplink Coverage Enhancement in 5G NR System / Y. Song, S. Lim, S. Lee, and J. Jang // 27th Telecommunications Forum (TELFOR) – 2019 – pp. 1-4 – DOI:10.1109/TELFOR48224.2019.8971225.
8. Васильківський, М., Коломієць, А., & Будащ, М. (2022). Оцінювання параметрів радіотрактів інфокомунікаційних систем 5G/6G. Вісник

- Хмельницького національного університету, (6), 53–60.  
<https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-53-60>
9. H. Zhang, Research on Coverage Enhancement Scheme of 5G Wireless Network based on Relay // *Mobile Communication* – 2019 – pp. 31-35.
  10. N. Li, Coverage Enhancement for 5G NR Networks: Solutions, Specification Impact and Performance Analysis / N. Li, H. Yin, J. Zhu, J. Guo and X. She // 2021 7th International Conference on Computer and Communications (ICCC) – 2021 – pp. 2244-2248 – DOI: 10.1109/ICCC54389.2021.9674244.
  11. B. Pavel, Nonlinear Distortion in a Microwave High Power Amplifier / B. Pavel, D. Matoušek and L. Rejcek // 2019 29th International Conference Radioelektronika – 2019 – pp. 1-4 – DOI: 10.1109/RADIOELEK.2019.8733505.
  12. N. A. Vu, A LUT-based LNA Nonlinear Distortion Compensation Scheme in Direct-Sampling Receivers / N. A. Vu, H. N. Le, T. H. T. Tran, V. P. Hoang, Q. K. Trinh // 2020 IEEE Eighth International Conference on Communications and Electronics (ICCE) – 2021 – pp. 24-29 – DOI: 10.1109/ICCE48956.2021.9352138.
  13. Q. Ye, H. He, T. Islam, G. Ermolaev, Physical Downlink Control Channel Based Wake Up Signal – U.S. patent US20220182938 – 2020.
  14. Васильківський, М., Болдирева, О., Варгатюк, Г., & Будащ, М. (2023). Оптимальні сигнально-кодові конструкції для підвищення ефективності інфокомунікаційних радіосистем мобільного зв'язку 5G та 6G. Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки. – 2023. – № 2. (319). – С. 48–55. doi: 10.31891/2307-5732-2023-319-1-48-55
  15. T. Islam, H. He, G. Ermolaev, Downlink Control Channel Signaling for Improved Power Consumption at a User Equipment (UE) – U.S. patent US20210176762 – 2020.
  16. Q. Ye, H. He, T. Islam, G. Ermolaev, Cross-slot Scheduling Power Saving Techniques – U.S. patent US20220210736 – 2022.
  17. 3GPP, Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, TR 38.901 // Published by 3rd Generation Partnership Project (3GPP) – 2019.

18. 3GPP, Study on User Equipment (UE) power saving in NR, TR 38.840 // Published by 3rd Generation Partnership Project (3GPP) – 2019.
19. T. Islam, H. He, Q. Ye, G. Ermolaev, System and Method of Adaptation of Reference Signal (RS) Monitoring for User Equipment (UE) Power Saving – U.S. patent US20220124622 – 2020.
20. G. Xiong, S. Sosnin, G. Ermolaev, J. Zhu, Enhanced Inter-Slot Frequency Hopping for Uplink Coverage in 5G Systems – PRC patent CN116601898 – 2023.
21. G. Xiong, S. Sosnin, G. Ermolaev, J. Zhu, A. Sengupta, A. Davydov, Coverage Enhancement for Physical Uplink Control Channel Transmissions in New Radio – US patent US20210298048 – 2021.
22. G. Xiong, S. Sosnin, G. Ermolaev, J. Zhu, D. Chatterjee, Time-Domain Resource Allocation for Transport Block Over Multiple Slot (TBoMS) Transmissions – PRC patent CN116830508 – 2023.
23. Васильківський, М., Прикмета, А., Олійник, А. і Ксьондз, Н. 2023. Оптимізація програмно-конфігурованих літаючих мереж доступу. КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО. 52 (Вер 2023), 128-139. DOI:<https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-16>.
24. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

Додаток А  
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА  
МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА  
ЗАВАДОСТІЙКОСТІ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ 6-ГО ПОКОЛІННЯ

назва магістерської кваліфікаційної роботи

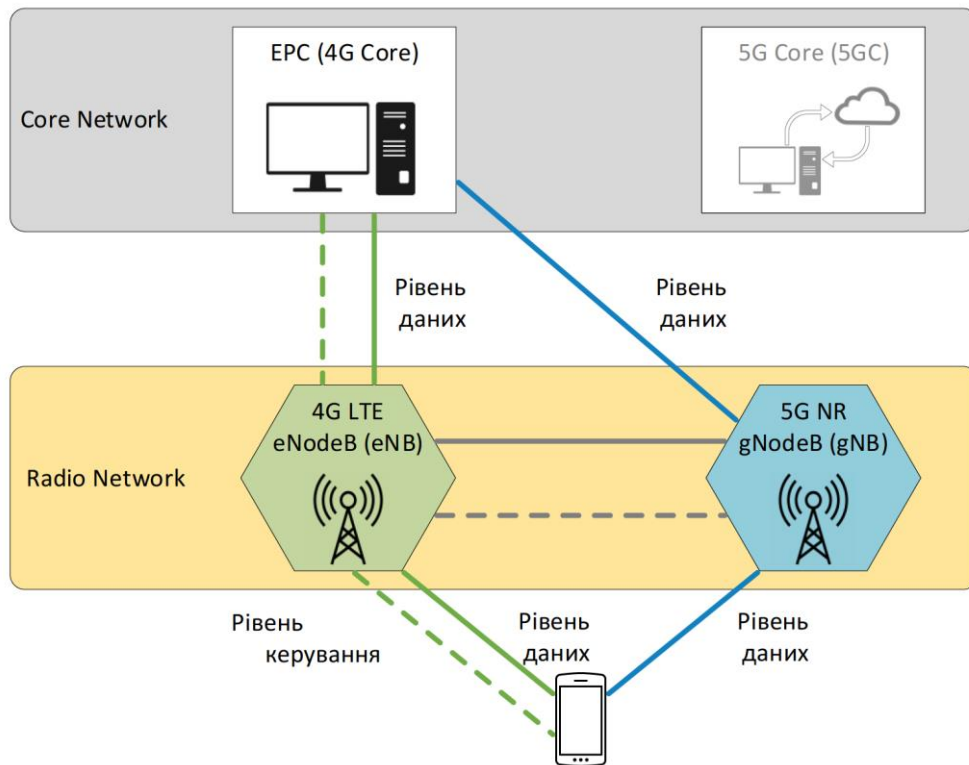


Рисунок 1 – Схема розгортання неавтономних мереж 5G

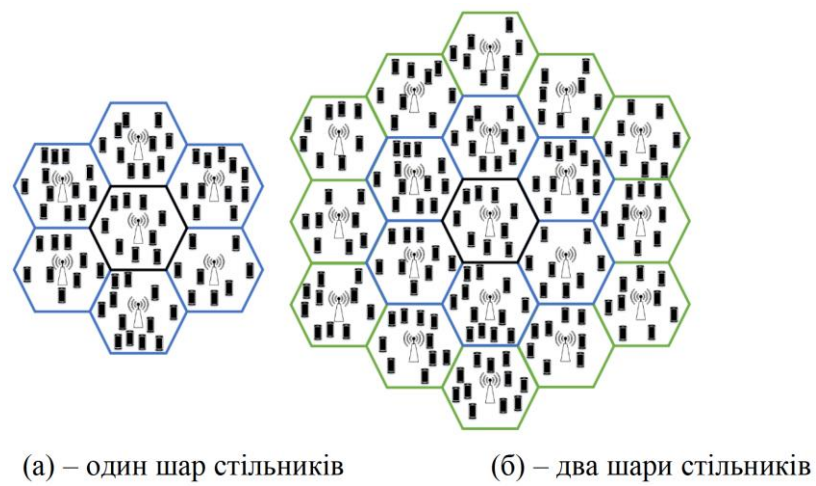
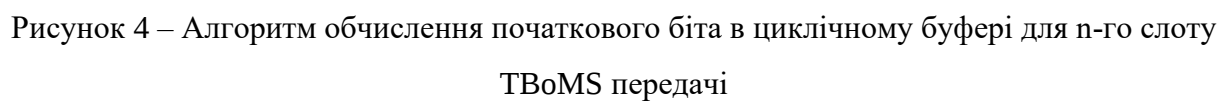


Рисунок 2 – Структура мережі мобільного стільникового зв'язку



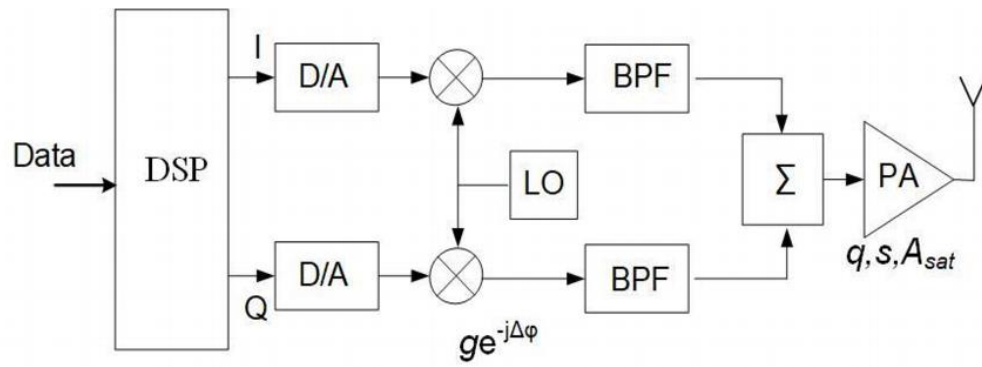
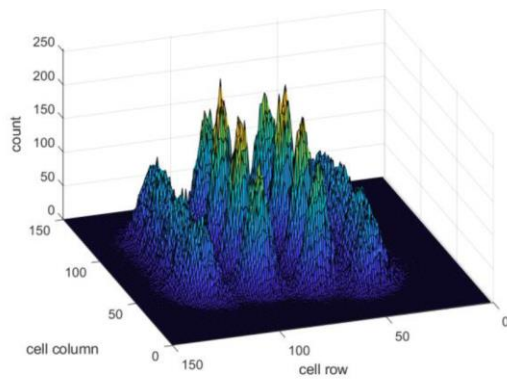
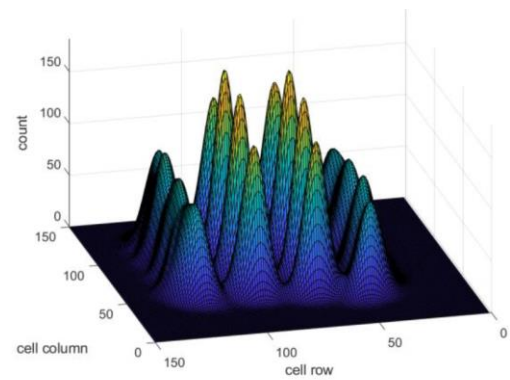


Рисунок 5 – Узагальнена структурна схема передавача



(a)



(б)

Рисунок 6 – Гістограми модульованих сигналів до (а) і після (б) застосування двовимірної гаусівської фільтрації

## Додаток Б

# ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Методи підвищення енергоефективності та завадостійкості мобільних систем 6 покоління

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС

Керівник Кичак В.М., д.т.н., професор

## Показники звіту подібності

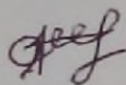
| Turnitin          |      |
|-------------------|------|
| Оригінальність    | 95 % |
| Загальна схожість | 5 %  |

## Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи (додається)

Автор



(підпис)

Топольський О.С.

(прізвище, ініціали)

## Опис прийнятого рішення

Особа, відповідальна за перевірку



(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

Експерт

(за потреби) (підпис)

(прізвище, ініціали, посада)