

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

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:
**«Мобільні мережі 5G із використанням волоконно оптичних
технологій»**

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТКС-22м
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

А. Сорока Сорока А.І.

Керівник: д.т.н., професор каф. ІКСТ

В. М. Кичак Кичак В.М.

« 8 » 12 2023 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС

В. С. Осадчук Осадчук В.С.

« 11 » 12 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

В. М. Кичак д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 11 » 12 2023 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань - 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)

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

Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІКСТ
д.т.н., професор В.М. Кичак
“19” 09 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сороці Артуру Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Мобільні мережі 5G із використанням волоконно оптичних технологій

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “18” 09 2023 року № 247

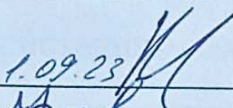
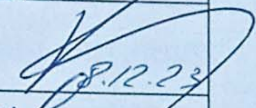
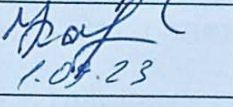
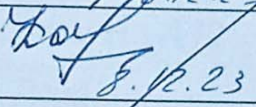

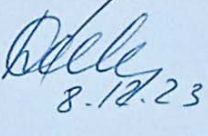
2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: технологія мобільного зв'язку – 5G; кадр даних (Data Frame) – 64 символи; пропускна здатність – до 25 Мбіт/с; час затримки – 10 мс; смуга частот каналу 100 МГц; максимальна швидкість абонента – 130 км/год.

4. Зміст текстової частини: Вступ; Аналіз поточного стану мережі 5G; Визначення основних характеристик мереж 5G та їх порівняння з існуючими мережами ІМТ; Модель продуктивності для мереж 5G, заснована на мобільності користувачів всередині та між стільниками; Економічна частина; Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; Список використаних джерел

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Структура мережі 5G; Архітектура мережі 5G. Мережеві функції та мережеві інтерфейси; Мережева архітектура LoRa; Моделювання LoRa в пакеті програм MatLab; Модель черги PS; Ілюстрація передачі даних між зонами та поза ними; Результати досліджень.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|--|--|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Спеціальна частина | Кичак В.В., професор кафедри ІКСТ |  1.09.23 |  8.12.23 |
| Економічна частина | Кавецький В.В., доцент кафедри ЕПВМ |  1.09.23 |  8.12.23 |
| Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях | Дембіцька С.В., професор кафедри БЖДПБ |  1.09.23 |  8.12.23 |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

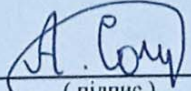
7. Дата видачі завдання 01 вересня 2023 року

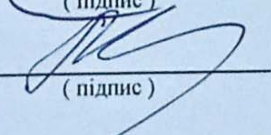
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|-------------------------------|----------|
| 1. | Розробка технічного завдання | 08.09.2023р. | |
| 2. | Техніко-економічне обґрунтування розробки | 17.09.2023р. | |
| 3. | Аналіз методів і засобів побудови мереж 5G | 06.10.2023р. | |
| 4. | Визначення основних характеристик мереж 5G | 27.10.2023р. | |
| 5. | Модель продуктивності для мереж 5G | 10.11.2023р. | |
| 6. | Аналіз економічної ефективності розробки | 17.11.2023р. | |
| 7. | Охорона праці та безпека життєдіяльності | 24.11.2023р. | |
| 8. | Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини | 01.12.2023р. | |
| 9. | Нормоконтроль МКР | 04.12.2023р. | |
| 10. | Попередній захист МКР, опанування МКР | 08.12.2023р. | |
| 11. | Захист МКР ЕК | 11.12.2023р. | |

Студент

Керівник роботи


(підпис)


(підпис)

Сорока А.І.

Кичак В.М.

АНОТАЦІЯ

УДК УДК 621.34

Сорока А.І. Мобільні мережі 5G із використанням волоконно оптичних технологій. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка, освітня програма - телекомунікаційні системи та мережі. Вінниця: ВНТУ, 2023. 120 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 43 назв; рис.: 27; табл. 19.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена актуальним питанням систем стільникового зв'язку, побудованих на основі стандарту 5G. Об'єктом дослідження є архітектура мереж мобільного зв'язку за технологією 5G з використанням волоконно-оптичних ліній зв'язку. Предметом дослідження є методи, моделі та алгоритми підвищення ефективності мереж мобільного зв'язку з використанням волоконно-оптичних технологій.

Графічна частина складається з 6 плакатів із результатами моделювання.

У розділі охорони праці опрацьовано такі питання, як причини виникнення, дія на організм людини та нормування шкідливих та небезпечних виробничих факторів у виробничому приміщенні; карта умов праці (обґрунтування вибору нормованих значень шкідливих та небезпечних виробничих факторів, оцінка факторів виробничого і трудового процесів, гігієнічна оцінка умов праці, оцінка технічного і організаційного рівня, атестація робочого місця); рекомендації щодо поліпшення умов праці, а також розглянуто норми пожежної безпеки.

Ключові слова: мережа 5G, мобільна мережа, якість обслуговування, теорія черг.

ABSTRACT

UDC UDC 621.34

Soroka A.I. 5G mobile networks using fiber optic technologies. Master's qualification work in the specialty 172 - Telecommunications and Radio Engineering, educational program - Telecommunication Systems and Networks. Vinnytsia: VNTU, 2023. 120 c.

In Ukrainian. Bibliography: 43 titles; Figures: 27; Table 19.

The master's thesis is devoted to topical issues of cellular communication systems based on the 5G standard. The object of research is the architecture of mobile communication networks based on 5G technology using fiber-optic communication lines. The subject of research is methods, models and algorithms for improving the efficiency of mobile communication networks using fiber-optic technologies.

The graphic part consists of 6 posters with modeling results.

The occupational safety section deals with such issues as the causes of occurrence, effects on the human body and standardization of harmful and dangerous production factors in the production premises; a map of working conditions (justification for choosing standardized values of harmful and dangerous production factors, assessment of factors of production and labor processes, hygienic assessment of working conditions, assessment of technical and organizational level, certification of the workplace); recommendations for improving working conditions, and fire safety standards.

Keywords: 5G network, mobile network, quality of service, queueing theory.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| Перелік скорочень | 5 |
| Вступ..... | 6 |
| 1 Аналіз поточного стану мережі 5G | 9 |
| 1.1 Мережева архітектура 5G | 9 |
| 1.2 Основні принципи архітектури 5G | 12 |
| 1.3 Централізована та розподілена архітектури | 17 |
| 1.4 Програмні модулі або мережеві функції 5G | 19 |
| 1.4.1 Функція управління доступом і мобільністю (AMF)..... | 19 |
| 1.4.2 Функція керування сеансами (SMF) | 20 |
| 1.4.3 Функція передачі даних користувачів (UPF) | 20 |
| 1.4.4 Модуль уніфікованого керування даними (UDM) | 21 |
| 1.4.5 Уніфіковане база даних (UDR)..... | 22 |
| 1.4.6 Функція неструктурованого зберігання даних (UDSF) | 22 |
| 1.4.7 Функція вибору мережевого рівня (NSSF)..... | 23 |
| 1.4.8 Функція керування політиками (PCF) | 23 |
| 1.4.9 Функція забезпечення взаємодії з зовнішніми додатками (NEF)..... | 24 |
| 1.4.10 Сховище мережевих функцій (NF – NRF) | 25 |
| 1.4.11 Прикладна функція (AF) | 26 |
| 1.4.12 CUPS (управління та поділ площини користувача) | 26 |
| 1.4.13 Network Slicing | 27 |
| 1.4.14 Сесії PDU | 28 |
| 1.4.15 Тип PDU сесії | 29 |
| 1.4.16Режими роботи безшовної функції абонентських сесій та сервісів (режим SSC) | 30 |
| 1.5 Ідентифікатори користувачів | 31 |
| 1.5.1 Міжнародний постійний ідентифікатор підписки абонента 5G SUPI (Subscription Permanent Identifier)..... | 31 |
| 1.5.2 Постійний ідентифікатор обладнання користувача (PEI) | 31 |
| 1.5.3 Прихований ідентифікатор (SUCI) | 32 |
| 1.5.4 Глобальний унікальний тимчасовий ідентифікатор абонента 5G | 32 |
| 2 Визначення основних характеристик мереж 5G та їх порівняння з існуючими мережами ІМТ | 34 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.1 | Загальний опис послуг, які будуть надаватися в мережах 5G | 34 |
| 2.2 | Загальний опис технологічних рішень для радіоінтерфейсів 5G/IMT-2020 | 36 |
| 2.3 | Загальний опис технологічних рішень для мережевої інфраструктури 5G/IMT-2020 | 39 |
| 2.4 | Аналіз міжнародних тенденцій розвитку послуг у мережах мобільного зв'язку під час переходу на технології 5G/IMT-2020 | 41 |
| 2.5 | 5G-IoT-LPWAN: взаємодія | 43 |
| 3 | Модель продуктивності для мереж 5G | 58 |
| 3.1 | Методи моделювання продуктивності для мереж 5G | 58 |
| 3.2 | Системні та транспортні припущення..... | 59 |
| 3.3 | Модель | 62 |
| 3.4 | Межі продуктивності | 68 |
| 3.5 | Наскрізна продуктивність користувачів | 72 |
| 3.6 | Результати досліджень | 73 |
| 4 | ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА | 80 |
| 4.1 | Оцінювання наукового ефекту | 80 |
| 4.2 | Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи | 83 |
| 4.2.1 | Витрати на оплату праці..... | 83 |
| 4.2.2 | Відрахування на соціальні заходи..... | 86 |
| 4.2.3 | Сировина та матеріали | 87 |
| 4.2.4 | Розрахунок витрат на комплектуючі | 89 |
| 4.2.5 | Специфікування для наукових (експериментальних) робіт..... | 89 |
| 4.2.6 | Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт..... | 90 |
| 4.2.7 | Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень..... | 91 |
| 4.2.8 | Паливо та енергія для науково-виробничих цілей | 92 |
| 4.2.9 | Службові відрядження..... | 93 |
| 4.2.10 | Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації | 94 |
| 4.2.11 | Інші витрати..... | 94 |
| 4.2.12 | Накладні (загальновиробничі) витрати | 95 |
| 4.3 | Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи | 96 |
| 4.4 | Висновок до розділу 4..... | 97 |
| 5 | ОХОРОНА ПРАЦІ..... | 98 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 5.1 | Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи..... | 100 |
| 5.2 | Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії..... | 102 |
| 5.3 | Безпека у надзвичайних ситуаціях. Оцінка обстановки в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій..... | 107 |
| | Висновки..... | 110 |
| 6 | СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 112 |
| | Додаток А МОБІЛЬНІ МЕРЕЖІ 5G ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВОЛОКОННО- ОПТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА..... | 115 |
| | Додаток Б Протокол перевірки на плагіат..... | 124 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

5G – П'яте покоління

AF – Функція застосування

AMF – Функція управління доступом і мобільністю

AN – Мережа доступу

ARP – Протокол адресної роздільної здатності

BBU – Блок резервного живлення акумулятора

CN – Основна мережа

D-RoF – Цифрове радіо по оптоволокну

eMBB – Розширений мобільний ширококутовий зв'язок

IMEI – Міжнародна ідентифікація обладнання мобільних станцій

IoT – Інтернет речей

mMTC – Масивний зв'язок машинного типу

NEF – Функція мережевого впливу

NF – Мережева функція

NFV – Віртуалізація мережевих функцій

NRF – Функція репозиторію NF

NSSF – Функція вибору фрагментів мережі

PCF – Функція контролю політик

QoS – Якість обслуговування

RRH – Пульт дистанційного керування

SDN – Програмно-визначена мережа

SMF – Функція керування сеансами

SMSF – Функція SMS

UDM – Уніфіковане управління даними

UDR – Уніфіковане сховище даних

UDSF – Функція зберігання неструктурованих даних

UPF – Функція користувачького плану

URLLC – Наднадійний зв'язок із низькою затримкою

ВСТУП

Актуальність теми. 5G – це мобільна мережа 5-го покоління. Це новий глобальний стандарт бездротового зв'язку після мереж 1G, 2G, 3G і 4G. 5G забезпечує новий вид мережі, призначений для з'єднання практично всіх і всього разом, включаючи машини, приміщення та пристрої.

Безпроводова технологія 5G призначена для забезпечення більш високої пікової швидкості передачі даних з кількома Гбіт/с, наднизькою затримкою, більшою надійністю, більшою пропускнуою здатністю мережі, підвищеною доступністю та стабільнішою взаємодією з користувачем для більшої кількості користувачів. Вища продуктивність і підвищена ефективність розширюють можливості нових користувачів і об'єднують нові галузі. Зменшення затримки мережі – це важливий показник для телемедицини та інших галузей, для яких цей показник є критичним.

В Україні планувся запуск мереж п'ятого покоління в найбільших містах протягом трьох років. Тому вивчення мережевих архітектур п'ятого покоління з використанням волоконно-оптичних технологій є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень. Проблематика побудови мереж фіксованого та мобільного зв'язку широко досліджувалася у роботах провідних українських та зарубіжних вчених як М.М. Климаш, Л.Н. Беркман, С.В. Толюпа, С.І. Отрох, Р.Л. Політанський, С.В. Гаркуша, Р.С. Одарченко, І.П. Лісовий, В.М. Безрук, О.В. Лемешко, Л.С. Глоба, А.І. Семенко, В.О. Пелішок, M. Dohler, J. Gazda, L. Hanzo, M. Bennis, M. Matinmikko-Blue, P. Ahokangas, M. Jo, X. Ge, A. Luntovskyy, R. Tafazolli, T. Taleb, A. De Almeida, W. Chien, S. Kiyomoto, K. Letaief, Y. Dai, Y. Zhang, V. Sharma, D. Niyato та багатьма іншими [1–8].

Аналіз досягнень вітчизняних та зарубіжних дослідників підтверджує важливість теми досліджень та свідчить про те, що проблема побудови мереж на основі систем мобільного зв'язку 5G/6G є актуальною як в Україні, так і за її

межами. Ця проблема може бути вирішена шляхом розроблення комплексу методів управління автоматизованою мережевою інфраструктурою, що базується на штучному інтелекті та використанні смарт-контрактів на технології блокчейн. Цей комплексний підхід дозволить підняти техніко-економічну ефективність систем мобільного зв'язку на національному рівні. Висновок з цього аналізу полягає в тому, що розвиток методів, моделей та інструментів для побудови мультиоператорської інфраструктури мереж мобільного зв'язку становить науково-прикладну задачу, спрямовану на підвищення техніко-економічної ефективності для операторів та абонентів в умовах відкритого ринку радіочастотних ресурсів та мережевої інфраструктури.

Мета і завдання роботи. Метою магістерської роботи є аналіз архітектури мереж мобільного зв'язку 5-го покоління та визначення пропускної здатності мережі для користувачів мобільного зв'язку з використанням волоконно-оптичних технологій.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

1) проаналізувати поточний стан мережі 5G;

2) проаналізувати архітектуру мережі 5G та основні принципи роботи архітектури 5G;

3) визначити основні характеристики мережі п'ятого покоління;

4) розробити аналітичну модель мереж 4G/5G як системи черги розподілу ресурсів (ЧРР)

5) використовуючи розроблену модель, визначити такі основні характеристики, як пропускна здатність і затримка для мобільних користувачів всередині і зовні комірки.

б) розробити імітаційну модель у середовищі MatLab.

Об'єктом дослідження є архітектура мереж мобільного зв'язку за технологією 5G з використанням волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Предметом дослідження є методи, моделі та алгоритми підвищення ефективності мереж мобільного зв'язку з використанням волоконно-оптичних технологій.

Методи досліджень базуються на використанні: обчислювально-аналітичні методи за допомогою комп'ютера (система символічної математики MatLab).

Новизна одержаних результатів:

- а) розроблена аналітична модель мереж 4G/5G як системи масового обслуговування з сумісним використанням ресурсів;
- б) розроблена імітаційна модель в середовищі прикладних програм MatLab.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що отримана аналітична модель застосовується для розрахунків пропускної здатності і величини затримки в мережі 5G для мобільних користувачів всередині та поза стільником.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на ЛП науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету у 2023 році.

1 АНАЛІЗ ПОТОЧНОГО СТАНУ МЕРЕЖІ 5G

1.1 Мережева архітектура 5G

У вересні 2015 року на семінарі 3GPP в США була ініційована стандартизація мереж 5G. Згідно з цими планами, 1-й етап специфікацій має бути завершений до другої половини 2018 року, а 2-й етап – до грудня 2019 року. Нарешті, в грудні 2017 року була завершена стандартизація так званої Non-Stand-Alone архітектури побудови 5G.

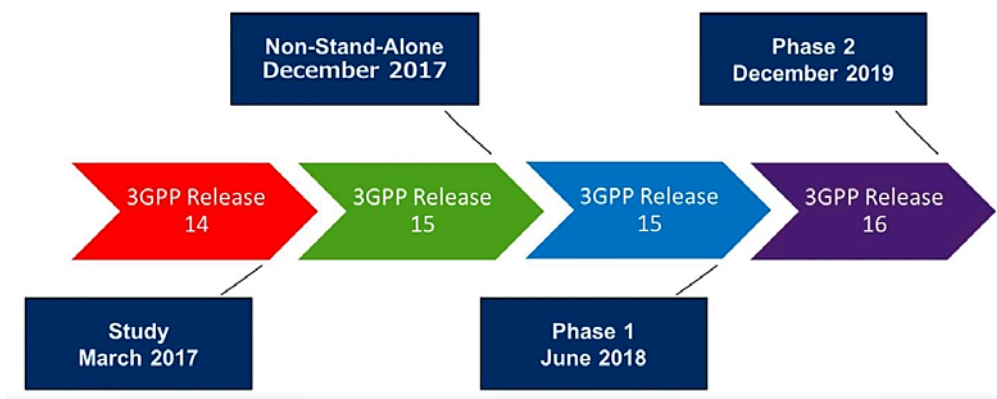


Рисунок 1.1 – Хронологія стандартизації мереж 5G

Розробляється архітектура мережі 5G для підтримки обміну різноманітними даними і надання різних послуг.

Особливість мережевої архітектури 5G полягає в тому, що вона базується не тільки на апаратному рішенні. На відміну від попередніх поколінь мереж, які будувалися на основі апаратних рішень, мережа 5G будується на базі програмних рішень. Тому цю мережу називають платформою. В її основі лежать програмно-визначені мережі (SDN), а також віртуалізація мережевих функцій NFV (Network Function Virtualization) [1].

Функції 5G реалізовані у віртуальних мережевих функціях (VNF), які працюють на інфраструктурі NFV. Різниця між цією та подібними за звучанням концепціями полягає в тому, що VNF є функцією, а NFV – технологією. У свою

чергу, NFV реалізується у фізичній інфраструктурі дата-центрів, дата-центрів, на базі стандартного комерційного обладнання COTS (Commercial Off The Shelf). Устаткування COTS включає в себе всього три види стандартних, відносно недорогих пристроїв – сервер (обчислювальний пристрій), комутатор (мережевий пристрій) і систему зберігання даних.

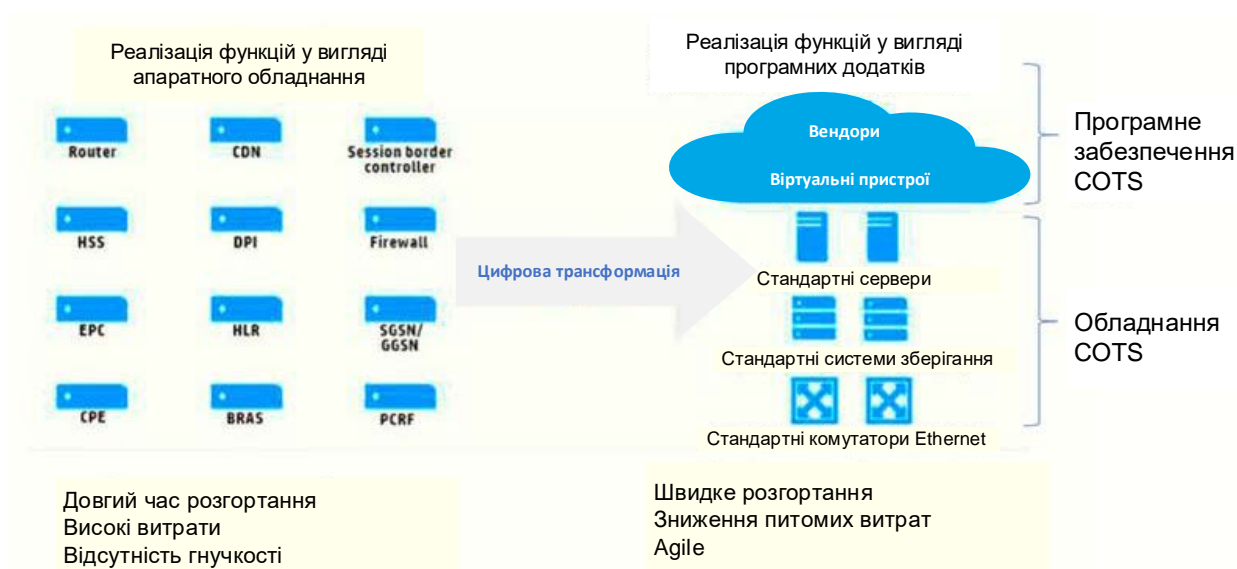


Рисунок 1.2 – Структура мережі 5G

Основними характеристиками мобільної мережі п'ятого покоління є:

- Розширений мобільний широкопasmовий зв'язок (eMBB);
- Наднадійний зв'язок із низькою затримкою (URLLC)
- Масове підключення різних датчиків і пристроїв зі світу Інтернету речей (massive Machine Type Communications, mMTC).

3GPP TR 38.913 визначає такі ключові показники для мереж 5G:

- 20 Гбіт/с пікова швидкість передачі даних низхідного каналу (спектральна ефективність 30 біт/с/Гц);
- 10 Гбіт/с пікова швидкість передачі даних висхідного каналу (спектральна ефективність 15 біт/с/Гц);
- мінімальна затримка в підсистемі радіодоступу для URLLC-сервісів – 0,5 мс, для сервісів eMBB - 4 мс;

- максимальна щільність пристроїв, що підключаються до мережі в міських умовах зі світу інтернету речей – 1 000 000 пристроїв/км²;
- автономна робота пристроїв зі світу «інтернету речей» без підзарядки акумулятора протягом 10 років;
- підтримка мобільності на максимальній швидкості 500 км/год.

Ці показники часом несумісні і навіть взаємовиключні. Тому різні пристрої матимуть доступ до певних сервісів з певними метриками лише в різні моменти часу (в рамках концепції Network Slicing).

Таким чином, основними особливостями мережі 5G є висока швидкість, велика кількість пристроїв і мінімальна затримка (рис . 1.3).



Рисунок 1.3 – Особливості мережі 5G

Розвиток мережі 5G відповідає вимогам сучасного суспільства. Поширення підключених об'єктів і пристроїв прокладе шлях для широкого спектру нових послуг і пов'язаних з ним бізнес-моделей для автоматизації роботи в різних промислових секторах і на вертикальних ринках (наприклад, енергетика, електронна охорона здоров'я, розумне місто, підключені автомобілі, промислове виробництво тощо). На додаток до більш поширених програм, орієнтованих на людину, таких як доповнення віртуальної та доповненої реальностей, потокового передавання відео 4k та інших. Автономно підключені пристрої створюватимуть мобільний трафік зі значно відмінними характеристиками, ніж сучасний трафік, переважно від людини до людини. Співіснування додатків, орієнтованих на

людину, і додатків машинного типу накладає дуже різноманітні функціональні та ключові показники ефективності (КРІ)/вимоги до продуктивності, які мережі 5G повинні будуть підтримувати.

Таким чином, концепція сегментації мереж буде задовольняти попит вертикальних секторів, які запитують виділені телекомунікаційні послуги, надаючи операторам орієнтовані на споживача описи вимог до сегментів мережі, як показано на рисунку 1.4 [3].

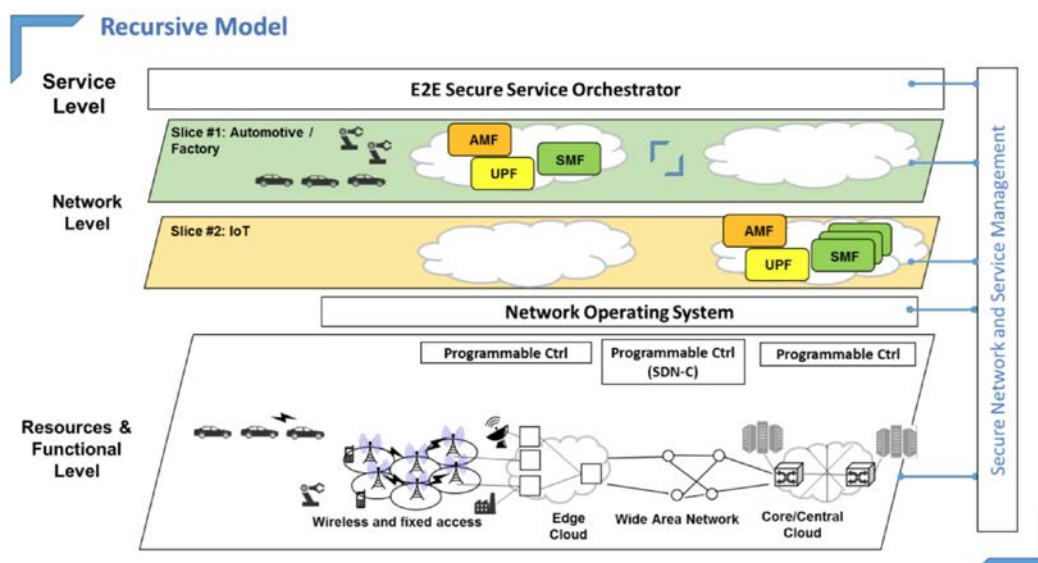


Рисунок 1.4 – Загальна архітектура мережі 5G

1.2 Основні принципи архітектури 5G

Основні принципи мережевої архітектури 5G полягають у наступному:

- поділ вузлів мережі на елементи, що забезпечують роботу протоколів «площини користувача» (UP) та елементи, що забезпечують роботу протоколів «площини управління» (CP), що значно підвищує гнучкість з точки зору масштабування та розгортання (що дозволяє централізовано та децентралізовано розміщувати окремі компоненти вузлів мережі);
- розподіл мережевих елементів, заснована на послугах, що надаються певним групам кінцевих користувачів.
- реалізація елементів мережі у вигляді VNF (Virtual Network Functions);

- підтримка одночасного доступу до централізованих і локальних служб, що дозволяє проводити туманні та периферійні обчислення
- визначення конвергентної архітектури, що об'єднує різні типи мереж доступу (AN – Access Network) – 3GPP (New Radio – NR) і non-3GPP (WiFi і т.д.) з єдиною опорною мережею (CN – Core Network);
- підтримка єдиних алгоритмів і процедур аутентифікації (незалежно від типу мережі доступу);
- підтримка мережевих функцій без стану, де обчислювальний ресурс відокремлений від ресурсу зберігання.
- підтримка роумінгу як через домашню мережу, так і з локальним проривом у гостьовій мережі (VPLMN)[1].

В архітектурі 5G взаємодія між мережевими функціями представлена двома способами:

- сервісно-орієнтовані, коли деякі мережеві функції (наприклад, AMF) дозволяють іншим авторизованим мережевим функціям отримувати доступ до своїх послуг;
- інтерфейсний, який показує, як відбувається взаємодія між службами мережевих функцій, описується як взаємодія «точка-точка» (наприклад, інтерфейс N11) між будь-якими двома мережевими функціями (наприклад, AMF і SMF).

Мережеві функції на площині управління 5G повинні використовувати для своєї взаємодії тільки сервісно-орієнтовані інтерфейси.

Рисунок 1.5 ілюструє архітектуру мережі 5G з точки зору сервісно-орієнтованої взаємодії різних функцій мережі на площині управління[1].

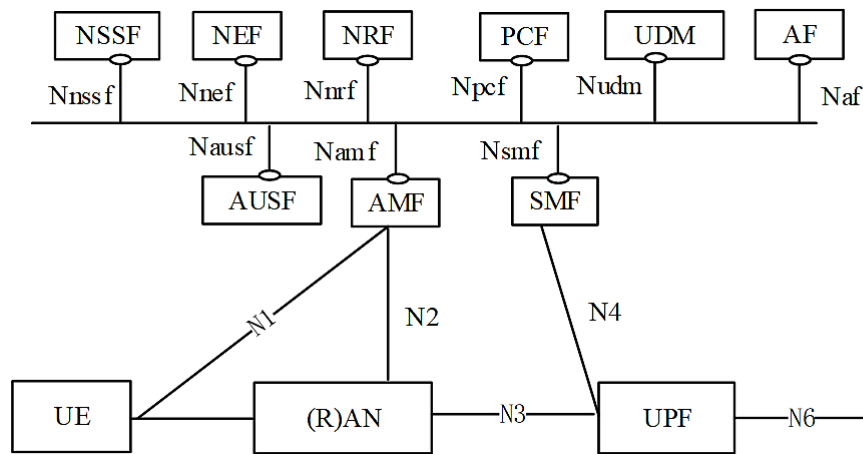


Рисунок 1.5 – Архітектура мережі 5G: Взаємодія мережевих функцій

Мережа 5G включає в себе наступні основні програмні модулі і мережеві функції (NF):

- функція управління доступом і мобільністю (AMF)
- функція керування сеансами (SMF)
- функція користувацької площини (UPF)
- модуль уніфікованого керування даними (UDM)
- уніфіковане сховище даних (UDR)
- система зберігання неструктурованих даних (UDSF)
- функція вибору мережевого шару (NSSF)
- функція контролю політики (PCF)
- функція забезпечення взаємодії з зовнішніми додатками (NEF)
- зберігання мережевих функцій (NRF)
- прикладна функція (AF)
- функція підтримки обміну короткими текстовими повідомленнями протоколе NAS (SMSF)
- функція взаємодії He-3GPP мережею доступу (N3IWF)[1].

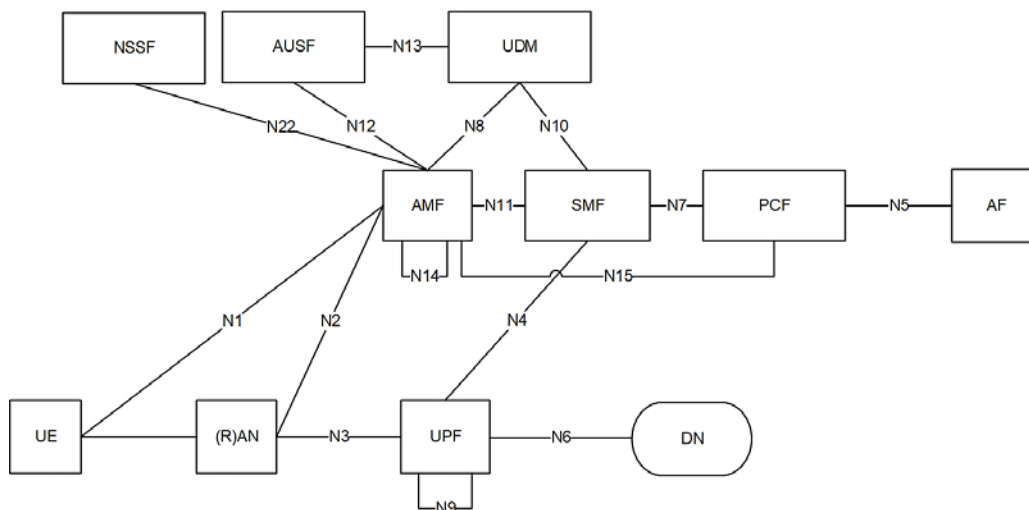


Рисунок 1.6 – Архітектура мережі 5G. Мережеві інтерфейси

На малюнку 1.6 представлена архітектура мережі 5G з мережевими інтерфейсами. Для спрощення діаграми на рис. 1.5 не показані мережеві функції UDSF, SDSF, NEF і NRF, а також UDR.

Стає очевидним, що існує потреба зіставити такі клієнтоорієнтовані угоди прорівень обслуговування (SLA) з ресурсоцентричними описами сегментів мережі, які полегшують створення та активацію екземплярів зрізів. Раніше оператори виконували таке відображення вручну для обмеженої кількості видів послуг/зрізів (переважно мобільного широкосмугового зв'язку – МВВ, голосового сервісу та SMS). Таким чином, зі збільшенням кількості таких звернень клієнтів і для відповідних сегментів мережі інфраструктура управління та моніторингу мобільних мереж повинна демонструвати значно вищий рівень автоматизації для управління всім життєвим циклом екземплярів сегментів мережі[1].

Точніше, автоматизація життєвого циклу зрізів повинна бути реалізована за допомогою архітектури, яка включає функції та інструменти, що реалізують когнітивні процедури для всіх фаз життєвого циклу: виділення, створення екземплярів, конфігурації та активації фаз виконання та фаз виведення з експлуатації. Два основних технологічних середовища включають м'яке оповіщення, таке як віртуалізація мережевих функцій, а також програмно-визначені програмовані мережеві функції та ресурси інфраструктури. Іншими ключовими елементами є ефективні процедури та протоколи управління та

оркестрації. Нарешті, масштабовані, орієнтовані на обслуговування алгоритми аналізу даних, які використовують багатодоменні джерела даних, доповнені надійними механізмами безпеки, прокладуть шлях до надійного розгортання спеціалізованих мережевих служб з різноманітними віртуалізованими NF (VNF) у спільній інфраструктурі у надійним способом.

Рекурсивна структура в контексті 5G може бути визначена як конструкція, правило або процедура, які можуть застосовуватися багаторазово [1,2]. У контексті мережевої служби ця рекурсивна структура може бути як певною частиною мережевої служби, так і повторюваною частиною платформи розгортання, і визначається як можливість створення сервісу з існуючих служб. Конкретний сервіс може бути рекурсивно масштабованим, що означає, що певний шаблон може замінити частину самого себе. Як і у випадку з визначенням рекурсивної служби, рекурсивна структура в архітектурі 5G (програмне забезпечення) може бути створена і повторний контакт. Це покращує масштабованість, оскільки один і той самий екземпляр може бути розгорнутий багато разів у різних місцях одночасно. Рекурсивність також полегшує керування еластичністю, масштабованістю та змінами. Рекурсивність шляхом делегування частин сервісу декільком екземплярам одного і того ж блоку додатків є природним способом обробки більш складних і великих працівників навантажень або графіків обслуговування. Якщо враховувати цю рекурсивність з самого початку розвитку 5G, то користь від такого підходу буде мінімальною.

У контексті віртуальної інфраструктури ця рекурсивна структура дозволяє екземпляру слайсу запускатися поверх ресурсів інфраструктури, наданих екземпляром слайсу нижче. Орендар (власник екземпляра слайсу) може керувати своєю віртуальною інфраструктурою, оскільки він працює з фізичною інфраструктурою, розподіляючи та перепродуючи частину ресурсів іншим клієнтам. Це означає, що кожен орендар може володіти та розгортати власну систему MANO. Для підтримки рекурсії вам потрібен набір основних API, які забезпечать рівень абстракції для управління кожним слайсом і управління базовими віртуальними ресурсами, який є прозорим для рівня ієрархії, на якому

працює орендар. Різні орендарі запитують представлення зрізів через ці API. За допомогою шаблону, плану або SLA кожен клієнт визначає більше, ніж просто характеристики зрізу (топологія, QoS тощо), але також і деякі просунуті атрибути, такі як необхідний рівень стійкості, управління та контролю. Постачальник повинен подбати про дотримання вимог та управління наявними ресурсами[1].

1.3 Централізована та розподілена архітектури

До недавнього часу розвиток мережі радіодоступу (RAN) було обумовлено поступовим впровадженням радіозв'язку та інтерфейсів для нових стандартів мобільного зв'язку та розширенням номенклатури радіообладнання для відповідних діапазонів частот на основі розподіленої архітектури (рис. 1.7а). Але вимоги до ємності, гнучкості та ефективності мереж 5G настільки великі. Це має на увазі перегляд існуючих функціональних і топологічних принципів побудови мережі RAN. Відправними точками для цього перегляду є неефективність протоколу Common Public Radio Interface (CPRI) з точки зору транспорту та перехід до централізованої архітектури.

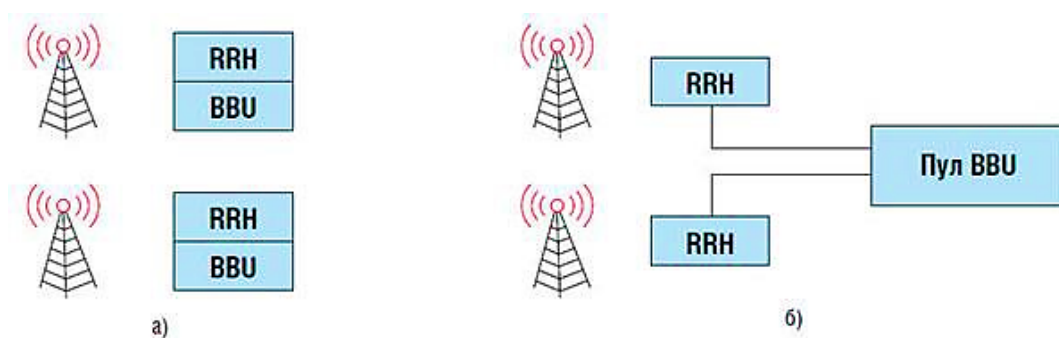


Рисунок 1.7 – Розподілені (а) та централізовані (б) архітектури RAN

Протокол CPRI використовується між радіомодулем віддаленого блоку (RRH) і цифровим модулем (BBU) базової станції. Він передбачає реалізацію принципу D-RoF (Digital Radio over Fiber) на транспортному каналі, при якому QAM-модульована радіосигнатура передається між BBU і RRH по двох несучих в

оцифрованому вигляді (дані IQ)). Тому, зокрема, при роботі в рамках технології LTE з шириною каналу 20 МГц, що забезпечує швидкість до 150 Мбіт/с, для транспортування CPRI потрібна смуга пропускання 2,5 Гбіт/с. Крім того, CPRI вимагає окремого підключення для кожної антени. А це означає, що при впровадженні рішення Massive MIMO в мережах 5G, таких як 64x64 MIMO, буде потрібно 384 окремих волокна або оператори DWDM.

Більшість експертів вважають, що централізована архітектура є оптимальною для 5G RAN (рис. 1.76). При цьому оптимальним варіантом буде побудова BBU з використанням технологій віртуалізації та хмарних обчислень.

Централізована архітектура RAN (C-RAN) передбачає, що BBU декількох базових станцій об'єднуються в хаби і розташовуються на одному майданчику. Це дозволяє використовувати більш ефективні алгоритми цифрової обробки, які значно збільшують пропускну здатність мережі за рахунок зменшення завад і кращого використання радіоресурсів. Крім того, зменшується кількість одиниць допоміжного обладнання (кондиціонери, роутери і т.д.), так як зменшується кількість майданчиків для їх розміщення. Відповідно, скорочуються капітальні витрати.

Якщо при побудові хабів BBU використовуються технології віртуалізації та хмарних обчислень, то вартість рішення може бути знижена за рахунок об'єднання обчислювальних потужностей і підвищення ефективності їх використання за рахунок нерівномірного навантаження в мережі. Відзначимо, що мережі RAN, побудовані на основі цих технологій, часто називають C-RAN, а «С» означає «Cloud (Хмара)».

Пом'якшення вимог до пропускну здатності транспортного каналу між RRH і BBU досягається за рахунок використання «розширеного» протоколу CPRI (eCPRI). Очікується, що його впровадження дозволить знизити вимоги до пропускну здатності більш ніж в 10 разів за рахунок перенесення деяких функцій цифрової обробки на RRH (новий функціональний спліт RRH/BBU). Комерційний використання розпочато з нових апаратних платформ BBU та RRH з підтримкою eCPRI [4].

1.4 Програмні модулі або мережеві функції 5G

1.4.1 Функція управління доступом і мобільністю (AMF)

Контроль доступу та мобільність (AMF) забезпечує:

- організацію інтерфейсів площини управління N1, N2;
- сигналізацію NAS через інтерфейс N1, шифрування та захист цілісності сигналізації NAS;
- управління реєстрацією терміналу користувача (UE) в мережі та контроль можливих станів реєстрації (RM-DEREGISTERED, RM-REGISTERED);
- управління підключенням терміналу користувача (UE) до мережі та моніторинг можливих станів підключення (CM-IDLE, CM-CONNECTED);
- управління доступністю терміналу користувача (UE) в мережі в стані CM-IDLE.
- управління мобільністю терміна користувача (UE) в мережі в стані CM-CONNECTED;
- передачу коротких повідомлень між обладнанням користувача (UE) та SMF.
- керування службами локації
- передавання повідомлень між UE та функцією керування розташуванням (LMF), а також між RAN і LMF
- виділення ідентифікатора потоку даних EPS (Evolved Packet System) для взаємодії з EPS;
- взаємодія з невизначеними мережами доступу 3GPP через модуль інтеперабельності N3IWF (Non-3GPP InterWorking Function)[1].

AMF також може включати підфункції управління безпекою, включаючи функцію прив'язки безпеки (SEAF), функцію управління контекстом безпеки (SCMF) і функцію управління політиками безпеки (SPCF).

Незалежно від кількості мережевих функцій, мережа доступу 5G має лише один екземпляр сигнального інтерфейсу NAS між обладнанням користувача та

мережею, який завершується однією з функцій мережі, що, у свою чергу, реалізує принаймні захист сигналів NAS та управління мобільністю[1].

1.4.2 Функція керування сеансами (SMF)

Session Management (SMF) забезпечує:

- управління сеансами зв'язку, тобто створення, модифікація та випуск сеансу, включаючи підтримку тунелів між мережею доступу (AN) та UPF;
- виділення та керування IP-адресами терміналів користувачів
- вибер, шлюза застосування UPF
- взаємодія з функцією керування політиками (PCF);
- керування роботою шлюзу UPF, включаючи керування застосуванням політик якості QoS.
- динамічна настройка призначених для користувача терміналів з використанням протоколів DHCPv4 (сервер і клієнт) і DHCPv6 (сервер і клієнт).
- Проксі-запити ARP (Address Resolution Protocol), як зазначено в IETF RFC 1027 та/або IETF RFC 4861 [54] для кадрів Ethernet (SMF відповідає на запити ARP, надаючи MAC-адресу, що відповідає IP-адресі, надісланій у запиті);
- контроль збору білінгових даних та організація взаємодії з білінговою системою;
- безперебійність (а не розрив) послуг SSC (Session and Service Continuity);
- взаємодія з гостьовими мережами як частина роумінгових процедур[1].

1.4.3 Функція передачі даних користувачів (UPF)

Функція User Data Transfer (UPF) забезпечує:

- інтерфейс для підключення до зовнішніх мереж передачі даних, в тому числі до мережі Інтернет;
- маршрутизація та пересилання пакетів даних користувача;

- буферизація пакетів та ініціювання сповіщення терміналів користувача (UE) про наявність даних низхідного каналу зв'язку (DL).
- маркування пакетів даних за необхідними параметрами QoS;
- діагностика пакетів штучного інтелекту (наприклад, виявлення додатків на основі шаблону потоку даних) і застосування мережевих політик відповідно до цільових позначень, згенерованих PCRF;
- звіти про використання трафіку
- проксі-запити ARP (Address Resolution Protocol), як зазначено в IETF RFC 1027 та/або IETF RFC 4861 [54] для кадрів Ethernet.

UPF також є опорною точкою для підтримки мобільності як всередині, так і між різними технологіями радіо-ступі (якщо застосовно).[1]

1.4.4 Модуль уніфікованого керування даними (UDM)

Модуль User Data Management (UDM) забезпечує:

- управління даними профілю користувача, включаючи зберігання та зміну переліку доступних користувачам послуг та відповідних їм параметрів;
- керування ідентифікацією користувача (SUPI)
- генерація облікових даних аутентифікації 3GPP АКА;
- авторизація доступу на основі даних профілю користувача (наприклад, обмеження роумінгу)
- управління реєстрацією користувачів (тобто зберіганням обслуговуючого AMF);
- підтримку безперервності обслуговування/сеансу, тобто зберігання призначених SMF/DNN для поточних сеансів зв'язку.
- управління доставкою SMS-повідомлень.

У той же час, кілька різних UDM можуть обслуговувати одного і того ж користувача для різних транзакцій[1].

1.4.5 Уніфіковане база даних (UDR)

UDR зберігає різні дані абонентів і має інтерфейси додатків Nudr з елементами доступу UDM FE, PCF FE, NEF FE[1].

1.4.6 Функція неструктурованого зберігання даних (UDSF)

Концепція побудови на опорній мережі 5GC має на увазі поділ мережевих функцій NF (Network Function) і систем зберігання даних, що генеруються і обробляються цими функціями (Storage). При цьому визначаються системи зберігання та обробки як структурованих, так і неструктурованих даних (UDSF – Unstructured Data Storage Function), тобто дані, які або не мають чітко визначеної структури, або дані, структура яких є сховищу невідома. Мережеві функції NF зв'язуються з системами зберігання даних USDF через інтерфейс N18. Одним із варіантів використання UDSF є зберігання поточних контекстів зареєстрованих терміналів користувача (UE) модулями контролю доступу та мобільності (AMF). Ця інформація може бути використана для забезпечення безперервності абонентських сесій, як у випадку запланованих вилучення однієї з груп моделей AMF (AMF Set) з сервісу, а також у разі виникнення аварійної ситуації. В обох випадках резервний AMF підхопить послугу, використовуючи збережені контексти попередник в UDSF.

Найбільш типовою реалізацією є об'єднання неструктурованого сховища даних (UDSF) та уніфікованої бази даних (UDR) на одній фізичній платформі.

Типова структура організації UDR/UDSF наведена на рисунку 1.8[1].

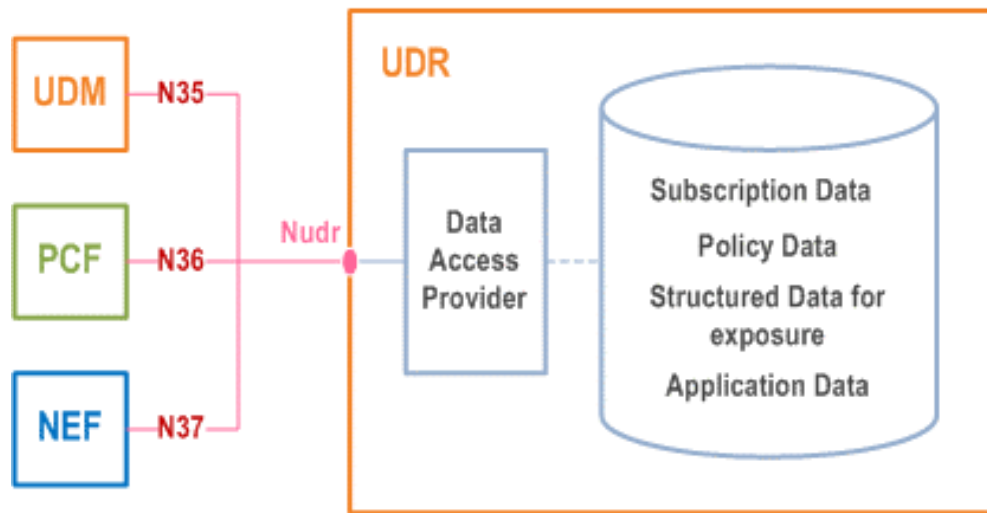


Рисунок 1.8 – Тип організації UDR/UDSF [4]

1.4.7 Функція вибору мережевого рівня (NSSF)

Функція вибору мережевого рівня (NSSF) забезпечує:

- вибір необхідного набору мережевих рівнів (Network Slices) в процесі реєстрації терміналу користувача в мережі (в залежності від виду послуги, що надається, типу обладнання абонентського терміналу, його розташування і т.д.);
- визначення модулів AMF, які будуть використовуватися для обслуговування терміналу користувача або, на основі налаштувань, визначення списку модулів AMF за допомогою запиту NRF.
- зберігання інформації про доступні мережеві шари (NSSAI)[1].

1.4.8 Функція керування політиками (PCF)

Керування політиками в режимі реального часу (PCF) генерує та призначає політики кінцевим точкам користувачів, включно з налаштуваннями якості обслуговування (QoS) і правилами виставлення рахунків. Наприклад, для передачі того чи іншого виду трафіку можуть динамічно створюватися віртуальні канали з різними характеристиками. При цьому можуть враховуватися вимоги запитуваної абонентом послуги, її профіль, місце розташування, рівень завантаження мережі,

обсяг споживаного трафіку і т.д.[1].

1.4.9 Функція забезпечення взаємодії з зовнішніми додатками (NEF)

NEF дозволяє зовнішнім платформам і додаткам безпечно обмінюватися даними з основною мережею 5G. Для виконання цього завдання NEF:

- Дозволяє платформам і додаткам підписуватися на певні події, згенеровані різними елементами мережі, і згодом отримувати сповіщення про настання цих подій. Наприклад:

- Loss of connectivity – детектування мережею втрати зв'язку з конкретним UE (виявлено AMF);

- UE reachability – відновлення зв'язку з конкретним UE (детектується AMF);

- Location Reporting - звіти про місцезнаходження (детектується AMF);

- Change SUPI-PE association – зміна терміналу абонентом мережі = зміна IMSI – IMEI (визначається UDM). Дозволяє надавати інформацію про конкретні UE в мережу 5G.

- Дозволяє керувати параметрами QoS та правилами тарифікації (PCC) для конкретних UE[1].

Для взаємодії з різними елементами, платформами та програмами (або мережевими функціями NF) NEF може підтримувати підмножину прикладних програмних інтерфейсів API. Безпека взаємодії забезпечується за допомогою механізмів безпеки NEF, включаючи аутентифікацію та авторизацію відповідних платформ і додатків. Таким чином, зовнішня сумісність додатків є логічним продовженням елемента SCEF архітектури вузькосмугового Інтернету речей (NB-IoT), оголошеної в 3GPP Release 13.

NEF може зберігати інформацію, отриману від NFs, як структуровані дані в UDR за допомогою стандартного інтерфейсу Nudr, а потім повторно використовувати її для трансляції іншими NFs або для цілей аналізу.

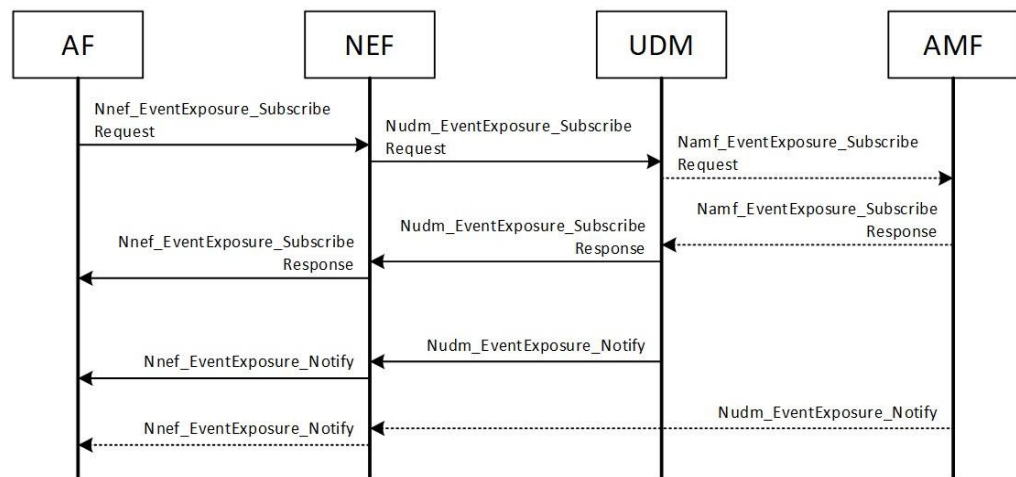


Рисунок 1.9 – Сповіщення про виникнення подій

1.4.10 Сховище мережевих функцій (NF – NRF)

Сховище мережевих функцій (NRF) є еволюцією сервера доменних імен DNS. Забезпечує зберігання профілів усіх екземплярів мережевих функцій, розгорнутих у мережі, та вибір одного або кількох екземплярів у рамках процедури «NF Discovery Request» процесу керування сеансами абонента. При цьому кожна мережева функція, коли вона включена, повинна «прописувати» свій статус в NRF, а також sd] функціональність та підтримувані опції.

Профіль екземпляра NF, який ведеться в NRF, містить таку інформацію:

- ідентифікатор екземпляра мережевої функції
- тип мережевої функції
- ідентифікатор PLMN
- ідентифікатор(и), пов'язані з мережевим рівнем, наприклад, S-NSSAI, NSI ID;
- FQDN або IP-адреса мережевої функції;
- інформація про ємність мережевої функції;
- інформація про дозволені сервіси;
- назви підтримуваних сервісів
- інформація про точки обміну для кожної послуги, що підтримується;
- ідентифікація збережених даних/інформації;

- інші параметри служби, наприклад, DNN (Data Network Name), налаштування інтерфейсу для сповіщень;
- рівень PLMN (NRF налаштовано на запуск на всіх PLMN)
- рівень мережевих шарів спільного використання (NRF налаштований на кілька мережевих рівнів)
- Рівень мережевих рівнів конкретного використання (NRF налаштовується з приналежністю у S-NSSAI)

При організації роумінгу в різних мережах може бути розгорнуто кілька NRF:

- NRF(и) у гостьових PLMN (відомих як vNRF), які налаштовано на роботу у гостьовому PLMN.
- NRF(и) у домашньому PLMN (відомому як hNRF) налаштовано на запуск у гостьовому PLMN, з яким vNRF обмінюється даними через інтерфейс N27.

1.4.11 Прикладна функція (AF)

Прикладна функція 5G (AF) взаємодіє з основною мережею і, наприклад, може виконувати такі завдання:

- управління маршрутизацією трафіку;
- надання доступу до модуля мережевої сумісності (NEF).
- взаємодія з функцією керування політиками.

Залежно від конкретної реалізації в мережі оператора, окремим зовнішнім платформам і додаткам може бути дозволений прямий (негайний) доступ до функцій мережі 5GC. Інші системи отримуватимуть доступ до мережевих функцій 5GC через API, що надаються модулем мережевої сумісності.

1.4.12 CUPS (управління та поділ площини користувача)

Відповідно до архітектури SDN для мереж 5G, шлюз пакетних даних розділений на два компоненти – площина управління SMF і площина трафіку користувача (CUPS). У той же час, заради об'єктивності слід зазначити, що поняття

CUPS також визначено випуском 14 3GPP для мереж 4G-LTE, де SGW поділяється на C-SGW (площина управління) та U-SGW (площина користувача), а PGW поділяється на C-PGW та U-PGW відповідно.

Спрощення архітектури UPF в порівнянні з PGW мережі 4G-LTE знижує як витрати на розробку і виготовлення самих вузлів, так і витрати на їх експлуатацію. В кінцевому підсумку це відкриває шлях для периферійних обчислень за рахунок можливості установки великої кількості шлюзів в мережі, розміщення їх в безпосередній близькості від мережі доступу. Однак такий підхід створює проблему мобільності, оскільки перенесення терміналу користувача з активною сесією даних буде супроводжуватися частою зміною UPF. 3GPP вирішує цю проблему, вводячи нову функцію – безшовна абонентська сесія та послуги – SSC (Session and Service Continuity).

1.4.13 Network Slicing

Network Slicing передбачає поділ фізичної архітектури 5G на кілька віртуальних мереж або рівнів. Кожен мережевий рівень включає функції площини управління, функції рівня трафіку користувача та мережу радіодоступу (5G-NR або non-3GPP). Виходячи з архітектури NFV/SDN, кожен рівень має свої особливості та спрямований на вирішення певної бізнес-задачі. 3GPP визначає три стандартні мережеві рівні:

- Enhanced Mobile Broadband (eMBB) – користувачі Інтернету, камери відеоспостереження;
- Ultra Reliable Low Latency Communication (URLLC) - безпілотний транспорт, доповнена і віртуальна реальність;
- Інтернет речей (IoT) – це мільйони пристроїв, які час від часу передають невеликі обсяги даних.

Кожен оператор може визначити додаткові мережеві рівні, наприклад, виділений мережевий рівень для критичного зв'язку, для внутрішньокорпоративного зв'язку тощо.

Певний термінал користувача (UE) може обслуговуватися одночасно одним або декількома мережевими шарів (максимум до 8). При цьому модуль AMF є загальним для всіх шарів, а ось інші елементи (включаючи SMF, UPF) можуть відрізнятися. Також різні шари можуть включати в себе різні мережі радіодоступу, або одну мережу, але з різними характеристиками. І, як один із бізнес-кейсів, мережеві рівні можуть мати різні налаштування безпеки.

Під час реєстрації в мережі в рамках процедури підключення RRC (і далі – повідомлення NAS) термінал користувача (UE) передає список запитуваних мережевих рівнів (S-NSSAI – Single Network Slice Selection Assistance Information). На першому кроці на підставі даних, отриманих від UE, списку мережевих шарів, що містяться в профілі користувача UDM і місцезнаходження абонента, вибирається елемент AMF, який може надати необхідний набір послуг. Вибір AMF включає селектор мережевого рівня (NSSF) і репозиторій мережевих функцій (NRF).

На другому кроці призначається модуль управління сесією (SMF) і далі – Шлюз передачі трафіку користувачів (UPF). SMF/UPF може призначатися відповідно до статичних налаштувань або динамічно (через репозиторій мережевих функцій – NRF).

1.4.14 Сесії PDU

В архітектурі 5G взаємодія призначених для користувача терміналів (UE) з мережами передачі даних здійснюється в рамках PDU-сесій. UE може мати кілька PDU, створених одночасно для зв'язку з різними мережами передачі даних та отримання різних послуг. У той же час різні сесії можуть бути організовані за допомогою різних мережевих функцій відповідно до концепції Network Slicing. Сесії PDU створюються тільки за запитом терміналу користувача. Однак архітектура 5G дозволяє прикладній функції (AF) ініціювати процедуру запуску програми на UE. Ця процедура ініціюється відправкою UE в тілі короткого SMS-повідомлення команди «Application trigger message», при отриманні якої

відповідна програма, встановлена на терміналі користувача, може запросити створення PDU-сесії.

На відміну від мереж 4G-LTE, в мережах 5G створення сесії повністю контролюється SMF і здійснюється в рамках діалогу сигналізації NAS SM між UE і SMF (при цьому AMF завершує інтерфейс N1 (NAS), тільки прозора транлює трафік NAS SM). В процесі свого існування сеанс PDU може бути переміщений між технологіями доступу 3GPP і non-3GPP.

Кожна сесія PDU характеризується наступними атрибутами:

- S-NSSAI (Single Network Slice Selection Assistance Information) – власне тип або ідентифікатор мережевого рівня;
- DNN (Data Network Name) — ім'я зовнішньої мережі передачі даних, фактично аналогічне назві точки доступу 2.5G/3G/4G-LTE (APN);
- PDU Session Type - тип PDU сесії;
- SSC mode - режим роботи функції безшовності абонентських сесій та послуг;
- PDU Session Id – унікальний для даного UE ідентифікатор PDU ;
- User Plane Security Enforcement information – інформація для забезпечення безпеки трафіку користувачів, включаючи шифрування та контроль цілісності.

1.4.15 Тип PDU сесії

3GPP визначає 5 можливих типів сесій PDU – Ipv4, Ipv6, Ipv4v6, Ethernet і Unstructured. Перші три типи мережі 5G успадковані від технологій попереднього покоління (2.5G/3G/4G-LTE). Їх використання передбачає присвоєння відповідної адреси (Ipv4 або Ipv6) терміналу користувача (UE) для кожного сесійного PDU. Крім того, мережа може визначати UE-адреси DNS-серверів, P-CSCF (для сесії IMS), MTU та GPSI (загальний публічний ідентифікатор підписки користувача).

Тип PDU сесії «Ethernet» не використовувався мережами попередніх поколінь. Цей тип передбачає обмін кадрами Ethernet між терміналом користувача

(UE) і мережею відповідно до MAC-адрес джерела і пристрою. Мережа 5G не присвоює UE IP або MAC-адресу, але UE може мати IP-адресу, яка або статично записана, або динамічно призначена DHCP-сервером, розташованим в одному ширококомовному домені з ним. Однак ця IP-адреса жодним чином не використовується мережею 5GC і заголовок IP-рівня пакета прозора пропускається через мережу. UE можна ввімкнути в режимі мосту. При цьому UE може бути локальною мережею (LAN) з декількома пристроями, які мають власні MAC-адреси (ці пристрої не аутентифіковані мережею 5G). При авторизації PDU сеансу DN-AAA сервер може призначити список дозволених MAC-адрес (до 16) SMF для даного сеансу, при цьому всі кадри Ethernet, маршрутизовані UE у висхідному каналі, повинні містити тільки дозвалені адреси в якості вихідного MAC. Кадри, які не відповідають цій умові, будуть заблоковані[5].

Тип PDU сесії «Unstructured» орієнтований в першу чергу на пристрої з «Інтернету речей», які передають і приймають дані, що не належать до IP. Для цього типу сесії 5GC створює тунель між UPF і сервером додатків, в який інкапсулюються неструктуровані дані, згенеровані сесією[6].

1.4.16 Режими роботи безшовної функції абонентських сесій та сервісів (режим SSC)

3GPP визначає три режими роботи режиму SSC:

Режим 1 – UPF не змінюється, коли термінал користувача (UE) виконує процедуру передачі. Відповідно, UE обслуговується одним шлюзом UPF і має незмінну IP-адресу протягом усього сеансу.

Режим 2 – є можливість змінити UPF, коли термінал користувача (UE) виконує процедуру передачі. У цьому випадку спочатку завершується сесія з поточним шлюзом (UPF-old), а потім встановлюється сесія з новим шлюзом (UPF-new). Відповідно, можливе короткочасне переривання сесії та зміна IP-адреси.

Режим 3 – також можна змінити UPF, коли термінал користувача (UE) виконує певний відсоток процесу передачі. Однак спочатку встановлюється сеанс

з новим шлюзом (UPF-new), а потім сесія з поточним шлюзом (UPF-old) завершується. Відповідно, забезпечується безперервність сесії, але допускається зміна IP-адреси[8].

1.5 Ідентифікатори користувачів

1.5.1 Міжнародний постійний ідентифікатор підписки абонента 5G SUPI (Subscription Permanent Identifier)

Він закріплюється за кожним абонентом мережі 5G і зберігається в єдиній базі даних UDM і модулі USIM користувача. Ідентифікатор SUPI може бути міжнародним ідентифікатором абонента мобільного зв'язку – IMSI (International Mobile Subscriber Identity), або ідентифікатор доступу мережі Network Access Identifier (NAI), формат якого визначається RFC 4282[5].

1.5.2 Постійний ідентифікатор обладнання користувача (PEI)

В даний час 3GPP визначає тільки один можливий формат PEI, який є IMEI (International Mobile Station Equipment Identity). IMEI є унікальною цифровою послідовністю, і її необхідно призначити всім терміналам користувача (UE), які підтримують технологію радіодоступу 3GPP під час їх виробництва.

При цьому слід розрізняти дві форми представлення – власне IMEI, що складається з 15 десяткових цифр, і IMEISV (16 цифр). IMEI включає в себе наступні поля:

- TAC (Type Allocation Code) – 8 десяткових цифр;
- SNR (Serial Number) – 6 десяткових цифр;
- CD (Check Digit) / SD (Spare Digit) – одна десяткова цифра.

IMEISV включає:

- TAC (Type Allocation Code) – 8 десяткових цифр;
- SNR (Serial Number) – 6 десяткових цифр;
- SVN (Software Version Number) – дві десяткові цифри.

TAC присвоюється GSMA відповідно до рекомендацій GSMA TS.06 і визначає код конкретної моделі терміналу користувача.

SNR присвоюється виробником і визначає серійний номер пристрою.

CD – це контрольна сума, обчислена за алгоритмом Луна.

SD – це заповнювач, який використовується у відповіді терміналу користувача (UE), коли запит IMEI надходить із сторони мережі (встановлено значення 0).

SVN – номер програмної версії UE.

У більшості моделей мобільних телефонів ви можете відобразити IMEI на екрані, набравши *#06# на клавіатурі пристрою [4].

1.5.3 Прихований ідентифікатор (SUCI)

Він є зашифрованою копією міжнародного ідентифікатора підписки абонента (5G SUPI) і дозволяє уникнути передачі 5G SUPI по мережі у відкритому вигляді, навіть під час первинної реєстрації терміналу користувача в мережі (Initial attach).

Інтегрована схема шифрування еліптичної кривої (ECIES) використовується для захисту SUPI. Відкритий ключ, який використовується для шифрування SUPI, повинен зберігатися в захищеній пам'яті USIM-картки; приватний ключ знаходиться в функціональному елементі вилучення ідентифікатора користувача (SIDF). У цьому випадку частина SUPI містить Mobile Country Code (MCC) і код мобільної мережі (MNC), який використовується для маршрутизації сигнального трафіку, не шифрується. 3GPP допускає можливість шифрування SUPI в терміналі користувача (опція за замовчуванням) і модулі USIM. Мережа оператора і термінал користувача також повинні підтримувати так звану нульову схему, в якій захист публічного ідентифікатора користувача не застосовується[8].

1.5.4 Глобальний унікальний тимчасовий ідентифікатор абонента 5G

Він призначається модулем управління доступом і мобільністю (AMF)

незалежно від типу мережі доступу (3GPP, не 3GPP). При «переході наEF-R» призначений для користувача термінал повинен використовувати 5G-GUTI (за винятком початкового приєднання, а також інших випадків, коли немає допустимого 5G-GUTI). Формат 5G-GUTI показаний на рис. 1.10[9].

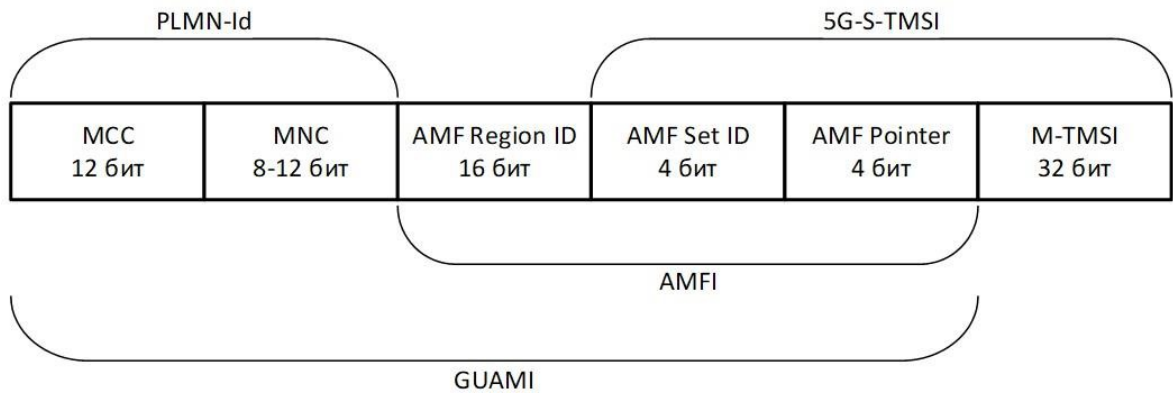


Рисунок 1.10 – Формат 5G-GUTI

Висновок до першого розділу

В першому розділі проведений аналіз мережі 5G, порівняно з попереднім стандартом 4G (LTE). Розглянуті структури мережевих функцій та мережевих інтерфейсів 5G. Нова архітектура мережі 5G дає можливість швидкого розвитку міжмашинної взаємодії та технології Інтернету речей, а також надає високу швидкість передачі даних, можливість підключення більшої кількості пристроїв.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕРЕЖ 5G ТА ЇХ ПОРІВНЯННЯ З ІСНУЮЧИМИ МЕРЕЖАМИ ІМТ

2.1 Загальний опис послуг, які будуть надаватися в мережах 5G

Існуючі мережі 4G не дозволяють в необхідній мірі задовольнити нові потреби абонентів в інноваційних послугах мобільного зв'язку. При цьому оператори зіткнулися з недостатньою гнучкістю мереж зв'язку, зростанням їх складності та збільшенням вартості їх експлуатації. Технології 5G/ІМТ-2020, які дозволяють пом'якшити ці недоліки, є закономірним етапом розвитку мобільних мереж.

Міжнародний союз електрозв'язку та ІТУ-R визначили показники основних експлуатаційних характеристик мережі, досягнення яких дозволяє віднести її до мереж 5-го покоління:

- збільшення пропускної здатності мережі (збільшення швидкості передачі даних на одного абонента в 10-100 разів - до 10 Гбіт/с (DL) і до 5 Гбіт/с (UL);
- забезпечення зростання споживаного трафіку на 1 абонента (зростання в 1000 разів) - до 500 Гб на користувача в місяць;
- збільшення числа підключених абонентських пристроїв в комірці в 10-100 разів - до 300 000 на вузол і до 1 млн пристроїв на 1 км²;
- Зменшення наскрізної затримки передачі даних в мережі з 10 мс до 1 мс; - до 3-х разів збільшення спектральної ефективності радіоінтерфейсу;
- багаторазове збільшення часу автономної роботи абонентських пристроїв з низьким енергоспоживанням, таких як датчики ІоТ/М2М/Д2Д – до 10 років;
- зниження вартості експлуатації та енергоспоживання мереж 5G/ІМТ-2020 до 10 разів у порівнянні з мережею 4G[5,6].

Послуги, що надаються мережею зв'язку 5G/ІМТ-2020, класифікуються ІТУ-R на 3 групи:

Перша група: просунутий мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB). Ця група сервісів охоплює орієнтовані на людину випадки використання, які

забезпечують доступ до мультимедійного контенту, сервісів і даних (аналогічно тим, які зараз надають мережі LTE). До таких послуг належать: Ultra HD та відео, 3D-відео, включаючи відео в реальному часі, онлайн-ігри, віртуальна реальність (можливі застосування: освіта, розваги, охорона здоров'я, військова справа), розширені сервіси соціальних мереж, хмарні сервіси (можливі додатки: державні служби, бізнес-дodatки, обчислювальна техніка), голос, включаючи потокове передавання, музика в реальному часі, мовлення MBMS[5,6].

Для належної підтримки цих сервісів необхідно передбачити багатогігабітну швидкість передачі даних. У сценаріях eMBB важливе значення мають практична швидкість передачі даних користувача, трафік на одиницю площі, пікова швидкість передачі даних, мобільність, енергоефективність та ефективність спектру.

Друга група: великомасштабні системи міжмашинної взаємодії (MіoT). Цей варіант використання характеризується великою кількістю підключених пристроїв, які передають відносно невеликий обсяг даних і не так чутливі до затримок. Для того, щоб забезпечити якісну підтримку цих послуг, необхідно забезпечити низьку вартість абонентських пристроїв з підтримкою великої зони покриття та тривалим часом автономної роботи. Основні сфери застосування: енергетика, транспорт, охорона здоров'я, торгівля, громадська безпека, промисловість, житлово-комунальне господарство, безпілотні транспортні засоби. Сценарії MіoT характеризуються високою щільністю з'єднання та необхідністю підтримувати коректне функціонування великої кількості пристроїв у мережі. Для реалізації цього сценарію важлива низька вартість пристрою та його енергоефективність[5,6].

Третя група: наднадійна передача даних з низькою затримкою (URLLC). У цьому випадку використання існують суворі вимоги до показників функціонування мережі, таких як пропускна здатність, затримка та доступність. До таких послуг можна віднести бездротове управління промисловими та виробничими процесами (робототехніка), телемедицину, зокрема, хірургію, автоматизацію розподілу енергії в «розумній» електромережі, громадська безпека, розумні будинки та міста,

застосування розумних транспортних засобів та впровадження розумної дорожньої інфраструктури на базі V2X тощо. У деяких сценаріях низька затримка має велике значення для забезпечення роботи критично важливих служб безпеки, а також високий рівень мобільності у сфері послуг транспортної безпеки [5,6].

Для того, щоб бути реалізованими на мобільній мережі п'ятого покоління, три основні групи послуг, перерахованих вище, мережі 5G/IMT-2020 повинні мати такі характеристики:

- Гнучкість у використанні спектра та смуги пропускання – можливість проектування системи зв'язку стосовно до різних спектральних сценаріїв, і зокрема до можливості роботи в різних частотних діапазонах;

- надійність – це здатність надавати послугу з дуже високим коефіцієнтом доступності (де коефіцієнт доступності – це ймовірність того, що мережа буде працювати в будь-який момент часу) [5,6];

- стабільність – здатність мережі зберігати робочий стан під час і після впливу зовнішніх впливів (аварійних ситуацій, аварійних відключень електроенергії тощо);

- безпека і конфіденційність – можливість шифрувати і захищати цілісність даних абонента, запобігати несанкціонованому доступу, захищати мережу від злому, шахрайства тощо;

Це особливо важливо для пристроїв M2M, які потребують тривалого терміну служби батареї (наприклад, понад 10 років), оскільки їх поточне обслуговування ускладнене з фізичних або економічних причин.

2.2 Загальний опис технологічних рішень для радіоінтерфейсів 5G/IMT-2020

На відміну від попередніх поколінь, де для кожного нового покоління мереж зв'язку (2G, 3G, 4G) розроблявся новий радіоінтерфейс, мобільна мережа 5G/IMT-2020 планує використовувати як новий радіоінтерфейс (New Radio або NR за специфікаціями серії 3GPP 38), так і еволюцію стандарту LTE-Advanced[5,6].

Стандарт LTE-Advanced продовжує розвиватися, наближаючись за своїми

характеристиками до можливостей стандарту NR. Стандарт LTE-Advanced вже підтримує активні антенні системи, використання більш ефективного кодування та модуляції, агрегацію кількох частотних каналів та зменшення затримки на рівні радіоінтерфейсу. Однак структура радіоінтерфейсу NR спочатку була розроблена для забезпечення вищої швидкості передачі даних і меншої затримки, більш ефективного використання частотних ресурсів завдяки:

- Використання сигналів з більш широким спектром (до 100 МГц в діапазоні до 6 ГГц і до 400 МГц в діапазоні вище 6 ГГц);
- забезпечення мінімальних затримок на радіоінтерфейсі за рахунок можливості збільшення частоти слідування часових слотів кадрової структури, за рахунок модифікації протоколу управління радіоресурсами;
- застосування адаптивного до навантаження часового дуплексу;
- використання більш ефективних завадостійких кодів;
- використання активних антенних систем міліметрового діапазону з великою кількістю елементів, вузькою діаграмою спрямованості та високою селективністю;
- реалізація індивідуальних сценаріїв використання ресурсів смуги частот каналу NR для абонентських терміналів різних типів і потужностей (широкосмугових/вузькосмугових абонентських терміналів WB/NB UE, абонентських терміналів з агрегацією несучих CA UE)[5,6].

Незважаючи на більш низьку ефективність впроваджених технічних рішень в порівнянні з NR, еволюційний шлях розвитку має більш низьку вартість і забезпечує високу швидкість розгортання на базі існуючої інфраструктури, а також можливість обслуговування існуючих терміналів LTE.

Для того, щоб підтримувати підключення великої кількості малопотужних пристроїв, в рамках реалізації концепції IoT, 3GPP розробила режими роботи LTE, такі як eMTC і NB-IoT, які доповнюють можливості один одного. Технологія LTE-eMTC більше орієнтована на більш надійний зв'язок з підтримкою мобільності і можливістю більш високої швидкості передачі при втраті в максимальному покритті і енергетиці (в силу великих швидкостей передачі). NB-IoT оптимізована

для сегмента IoT, де потрібна максимальна дальність зв'язку, низькі швидкості та висока енергоефективність.

Радіоінтерфейс NR відіграє роль ключового радіоінтерфейсу для сценаріїв з високою пропускнуою здатністю та низькою затримкою. Передбачається, що New Radio буде розгорнуто як у нижньому, так і у верхньому діапазонах радіочастот. Ключовими особливостями радіоінтерфейсу є переглянута структура кадру з можливістю мінімізації затримки до 1 мс, ширші канали, ефективніше завадостійке кодування та ефективніше використання складних антенних систем.

Спектральна ефективність технології 5G/IMT-2020 значно вища, ніж у 4G, завдяки використанню передового радіоінтерфейсу. У діапазоні радіочастот міліметрового діапазону (26 ГГц) основний внесок у підвищення пікової спектральної ефективності досягається за рахунок використання Massive MIMO з великою кількістю випромінюючих елементів в активній антенній решітці, а вигреш може досягати 50-80%. Методи підвищення ефективності використання спектру в мережі 5G/IMT-2020, які були розглянуті в 3GPP, включають наступне[5,6]:

1. Удосконалені форми сигналів, модуляція та кодування, схеми множинного доступу:

- фільтроване OFDM (FOFDM);
- модуляція з множиною несучих з використанням банку фільтрів (FBMC)
- багатостанційний доступ з розділенням за шаблоном (PDMA)
- багатостанційний доступ на основі розріджених кодів (SCMA)
- багатостанційний доступ на основі перемежування (IDMA) та розподілення по несучим з низькою щільністю (LDS).

На даному етапі стандартизації технології 5G/IMT-2020 (3GPP release 15) в якості методу мультиплексування прийнято CP-OFDM (Cyclic-Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing) на «низхідному» каналі (DL) і CP-OFDM з DFT або без DFT в «верхньому» каналі (UL).

2. Антенні технології:

- формування 3D променя FD-MIMO (3D beamforming);

- активна антенна система (AAS) з решіткою випромінювачів;
- удосконалені системи з багатоканальним входом/ багатоканальним виходом (massive і multi user MIMO).

3. Гнучкість при використанні спектру:

- агрегація несучих з різним дуплексом (TDD і FDD);
- двоканальне підключення, в тому числі і в мультистандартній мережі;
- динамічний TDD.

4. Забезпечення прямого зв'язку між абонентськими терміналами.

5. Використання в мікростільниках схем модуляції більш високого порядку і використання опорних сигналів зі зменшеним обсягом накладної інформації (на основі використання функції Lean Carrier)[5].

2.3 Загальний опис технологічних рішень для мережевої інфраструктури 5G/IMT-2020

Мобільні мережі 5G/IMT-2020 повинні будуватися з використанням нових технологічних принципів:

- багатодіапазонна радіомережа;
- технологічна неоднорідність побудови мереж 5G/IMT-2020 (HetRAT) полягає в можливості одночасного використання мереж радіодоступу на різних радіотехнологіях 5G/4G/WLAN;

– інфраструктурна неоднорідність побудови мережі (HetNet) полягає в можливості одночасного використання та управління в одній комірці базових станцій різних рівнів – макро/мікро/піко та фемто.

Мережа 5G/IMT-2020 VTS повинна відповідати наступним високорівневим архітектурним вимогам:

- увімкнення різноманітних служб і додатків з різними вимогами до мережі, включаючи периферійні обчислення (MEC)
- швидке впровадження нових сервісів і додатків;
- Автоматична настройка і моніторинг сервісів, віртуальних і фізичних

ресурсів.

- забезпечення підтримки великої кількості мобільних операторів та виділених мереж, у тому числі для надання послуг IoT;
- забезпечення гарантованої якості обслуговування;
- забезпечення ефективного використання мережевих ресурсів, у тому числі використання радіочастотного спектра та смуги пропускання мережі[5].

Таким чином, мережа 5G/IMT-2020 має на увазі повністю автоматичне налаштування нових сервісів і додатків, швидкий розподіл необхідних мережевих ресурсів, ефективне використання частотної смуги і пропускну здатності мережі, забезпечення якості обслуговування.

Технологічного забезпечення вищевказаних вимог у мережах на основі технологій 5G/IMT-2020 має досягатися шляхом:

- реалізації принципу мережевої програмованості, що означає перехід від використання апаратних засобів до використання програмного забезпечення скрізь, де це можливо, включаючи реалізацію функцій управління і обробки сигнальної інформації, налаштування сервісів, віртуальних і фізичних мережевих ресурсів;
- Чіткий логічний поділ функцій площини управління від рівня даних користувача, включаючи базову мережу 5G/IMT-2020. Реалізація цієї можливості дозволить здійснювати незалежну розробку та масштабування програмного забезпечення та фізичних ресурсів, пов'язаних із цими рівнями;
- реалізація принципу логічних мережевих рівнів, що дає можливість автоматизувати процес налаштування мережевих ресурсів та адаптувати архітектуру мережі до вимог сервісів та мережевих сервісів;
- використання хмарних обчислень, що забезпечує можливість емуляції елементів мережі через сервіс «Інфраструктура як послуга» (IaaS);
- впровадження технологій NFV (Network Functions Virtualization) – віртуалізація фізичних мережевих елементів телекомунікаційної мережі, коли мережеві функції виконуються програмними модулями, що працюють на стандартних серверах і віртуальних машинах (VM) в них) і SDN (Software Defined Network – метод адміністрування комп'ютерної мережі, що дозволяє управляти

мережевими службами, коли функціонал управління віддалений від нижчого рівня (пересилки пакетів) в мережах радіодоступу (C-RAN), пакетних транспортних мережах, а також для віртуалізації функцій комутаційних вузлів мережі телефонії (vIMS - virtual IMS);

– реалізації функцій зберігання та доставки контенту для чутливих до затримок сервісів на межі мережі, максимально наближеної до споживача контенту (Mobile Edge Computing)[5,6].

2.4 Аналіз міжнародних тенденцій розвитку послуг у мережах мобільного зв'язку під час переходу на технології 5G/IMT-2020

5G/IMT-2020 – це новий стандарт зв'язку, технологічна еволюція мобільних мереж та нова парадигма телекомунікаційних та інформаційних технологічних послуг. Мережа 5G/IMT-2020 буде являти собою щільно розподілену матрицю наступних функцій: обчислення, зберігання та мережі[5,6].

Розвиток мереж мобільного зв'язку при переході на технології 5G/IMT-2020 характеризується наступними особливостями:

1. Впровадження принципово нових послуг, таких як:
 - Послуги на основі голограм та мультимедійні сервіси з повним ефектом присутності, включаючи трансляції спортивних програм та інтерактивні фільми з охопленням в 360°.
 - повномасштабні послуги віртуальної/доповненої реальності (VR/AR), включаючи AR-сервіси для навігації та водіння, діагностики та хірургічного втручання на відстані за допомогою робота-хірурга;
 - послуги з наднизькою затримкою, включаючи дистанційне керування роботом-рятувальником та автономне водіння;
 - послуги Інтернету речей (IoT), засновані на масовому підключенні пристроїв;
 - інтелектуальні сервіси, засновані на великих обсягах даних;
 - тактильний Інтернет[5].

2. Багаторазове зростання мобільного трафіку викликане:
 - збільшенням споживання відеосервісів та збільшення роздільної здатності відео;
 - збільшенням кількості пристроїв, що підключаються до мережі (смартфони, планшети, різні M2M і D2D пристрої, безпілотні транспортні засоби, тощо);
 - збільшення швидкості використання додатків
 - широким використанням хмарних технологій;
 - використанням сучасних онлайн-ігор та їх оновлень[5,6].
3. Переважна роль смартфонів як джерела трафіку мобільних даних.
 - у всіх регіонах земної кулі прогнозується різке зростання трафіку даних – у 6-10 разів, залежно від регіону;
 - близько 95% трафіку даних генеруватиметься смартфонами [5,6]
4. Мобільне відео є домінуючим ідентифікатором трафіку мобільних даних.
5. На першому етапі розвитку комунікаційних мереж 5G/IMT-2020 найбільшою популярністю користуватиметься функціонал та сервіси, пов'язані з мультимедійними розвагами з підвищеними вимогами до якості контенту: надання гігабітних швидкостей, прямі спортивні трансляції, фільми з елементами віртуальної реальності, використання елементів доповненої реальності для управління автомобілями в режимі реального часу. Абонентів також цікавлять такі нові послуги, як синхронний переклад з іноземної мови, «розумний будинок», управління дронами (безпілотними літальними апаратами).

Для потенційних абонентів мережі 5G/IMT-2020 менш важливі такі особливості: більш тривалий час автономної роботи смартфона, підвищена безпека особистих даних, найвища якість потокового відео, можливість підключення до мережі практично будь-якого пристрою в будинку.
6. Перетворення підприємств різних сфер і секторів економіки в контент-провайдерів мереж мобільного зв'язку. Провідні світові оператори мають намір розвивати послуги 5G як для абонентів, так і для корпоративного та промислового

використання.

7. Зміна способу монетизації послуг 5G/IMT-2020.
 - розвиток Інтернету речей (IoT/IIoT/M2M/D2D);
 - спільні проекти з компаніями з інших галузей;
 - галузеві проекти та сценарії з розподілом доходів[5,6].
8. Безпосередня зацікавленість адміністрацій зв'язку у швидкому та ефективному впровадженні різних технологій на основі мереж зв'язку 5G/IMT2020 в економіках своїх країн:
 - зусилля щодо глобальної або регіональної гармонізації спектру, виділеного для мереж 5G/IMT-2020;
 - зміни тарифів на використання 1 МГц спектра у зв'язку з необхідністю виділення значно ширших смуг безперервного спектру для ефективної роботи мереж 5G/IMT-2020;
 - створення державно-приватного партнерства для практичного розвитку мереж 5G/IMT-2020 в реальній економіці;
 - активне впровадження заходів з перетворення та перерозподілу спектру на користь мереж зв'язку 5G/IMT-2020[5,6].

2.5 5G-IoT-LPWAN: взаємодія

Технології 5G повинні забезпечувати більш високу пропускну здатність, ніж технології 4G, що дозволить забезпечити більшу доступність мобільного широкосмугового зв'язку, а також використання режимів «device-to-device» («пристрій-пристрій», пряме абонентське з'єднання), наднадійні масштабні системи зв'язку між пристроями, а також менша затримка, швидкість інтернету 1-2 Гбіт/с, менше споживання заряду батареї, ніж у обладнання 4G, що позитивно вплине на розвиток Інтернету речей (IoT)[8].

IoT – це категорія додатків. Ці програми можуть охоплювати стандарти 4G, 5G і 802.11. Застосунок, масштаб, діапазон і результат вашого проекту допоможуть вам вибрати найкраще рішення для підключення. Додатки IoT – це просто все, що

підключено або керовано через Інтернет. Вони варіюються від автомобілів до ліхтарів, ліків і навіть біологічних функцій.

Наступна еволюція, яку ми зараз починаємо, – це підключення пристроїв, які не мають або не потребують високої швидкості чи пропускної здатності, але потребують широкої зони підключення. Це включає все: від відстеження місцезнаходження до лічильників, приладів, сигналізації та індикаторів здоров'я людини.

Технології та рішення, які ми використовуємо (Ethernet, Wi-Fi та стільниковий зв'язок), є надлишковими для цього нового жанру зв'язку.

LPWAN має низьку пропускну здатність, малі частотні канали, широкі зони покриття та вимагає тривалого часу автономної роботи (5-10 років).

Технології LPWAN охоплюють як ліцензовані, так і неліцензовані частоти. У кожній підмножині (ліцензованих і неліцензованих) є кілька конкуруючих технологій і рішень.

Давайте подивимося на LPWAN з неліцензованої сторони. Це буде промисловий, науково-медичний (ISM) спектр, 900 МГц, 2,4 ГГц і 5 ГГц. Ключові гравці зосереджуються на низьких частотах, щоб збільшити дистанцію за рахунок пропускної здатності, яка їм не потрібна для їхніх сегментів ринку.

У цій сфері та в процесі побудови мереж SigFox, LoRa та Ingenu є одними з основних рішень.

Розробники LoRa Alliance вважають, що технологія LoRa має значні переваги перед WiFi та стільниковими мережами, завдяки можливості розгортання з'єднань «машина-машина» (M2M) на відстані до 20 км зі швидкістю до 50 Кбіт/с, а також наявності можливості розгортання з'єднань «машина-машина» (M2M), а також мінімальне енергоспоживання, що забезпечує кілька років автономності від однієї батарейки типу AA. Сфера застосування цієї технології велика: від домашньої автоматизації та Інтернету речей до промисловості та розумних міст [7,9]. LoRa є наступним кроком у розробці рішення LPWAN, яке було розроблено та запатентовано корпорацією Semtech. Суть технології зводиться до варіації лінійної частотної модуляції (Chirp Spread Spectrum, CSS). Технологія

використовує кодування даних широкосмуговими імпульсами з частотами, які зменшуються або збільшуються в певний часовому інтервалі. Таке рішення дозволяє приймачу бути стійким до відхилень частоти від номінального значення і спрощує вимоги до тактового генератора, тим самим дозволяючи використовувати недорогі кварцові резонатори.

Система використовує пряму корекцію помилок (FEC) і працює в субгігерцовому діапазоні частот: 169, 433 і 915 МГц в США, і в Європі в діапазоні 868 МГц. Найчастіше використовуються робочі частоти 868 і 915 МГц. Також через високий рівень зовнішнього впливу обмежений робочий діапазон 2,4 МГц [10, 11]. Згідно зі специфікацією [7,12], LoRa (а також SIGFOX) використовує циклічно єдину опцію передачі, яка обмежує швидкість генерації повідомлень. Однак, підтримуючи кілька каналів, LoRa дозволяє кінцевим вузлам брати участь у процедурах обміну даними, змінюючи несучу частоту при дотриманні ліміту безмитного циклу в кожному каналі. Вибір швидкості передачі даних – це компроміс між покриттям і обсягом даних, повідомлення з різною швидкістю передачі даних не заважають один одному. Швидкість передачі даних LoRa коливається від 0,3 до 50 кбіт/с. Щоб максимізувати час автономної роботи кінцевих пристроїв і загальну ємність мережі, мережева інфраструктура LoRa може контролювати швидкість передачі даних для кожного пристрою окремо за допомогою адаптивної швидкості передачі даних. Якщо реалізація LoRa залишається закритою, то решта стека протоколів, відома як LoRaWAN, залишається відкритою, а її розробкою займається LoRa Alliance на чолі з IBM. Відмінною особливістю мережі LoRa є те, що вона надає три класи пристроїв для вирішення різних завдань і додатків в мережі. На рис. 2.1 показані класи пристроїв: клас А (для всіх), клас В і клас С.

| | | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|---------------|----------|
| Додаток | | | | |
| LoRa® MAC | | | | |
| MAC опції | | | | |
| Клас А (базовий рівень) | Клас В (базовий рівень) | Клас С (постійний) | | |
| LoRa модуляція | | | | |
| регіональний діапазон ISM | | | | |
| EU 868 | EU 433 | US 915 | AS 430 | — |

Рисунок 2.1 – Класи пристроїв у мережах LoRa

«Клас А» визначає функціональний режим за замовчуванням у мережах LoRa. У «Класі А» сеанс зв'язку здійснюється кінцевим пристроєм. Вузол передає дані короткими відправками за заздалегідь заданим розкладом на шлюз. Після кожної передачі даних термінальний пристрій відкриває одне приймальне вікно до шлюзу, але деякий час, чекаючи наступної команди, надісланої сервером. У тому випадку, якщо відгуку немає, вузол переходить в сплячий режим, тим самим знижуючи енергоспоживання. Друге вікно відкривається в іншому піддіапазоні (попередньо узгодженому з сервером) з метою підвищення стійкості до коливань каналу. Сервер накопичує дані і відправляє їх, як тільки вузол виходить на зв'язок. Мережі «класу А» призначені в основному для моніторингу додатків, вони є найбільш економічними в плані енергоспоживання і найбільш поширеними на практиці [12, 13]. У «Класі В» є додаткове вікно прийому, яке відкривається пристроєм за розкладом. За спеціальним сигналом «маяк» від шлюзу кінцевий пристрій здійснює синхронізацію внутрішнього часу з часом мережі, тим самим створюючи розклад. Таким чином, завдяки такому додатковому вікну сервер має можливість почати передачу даних в заздалегідь обумовлений час. Нарешті, пристрої «класу С» мають максимальне, майже неперервне, вікно прийому, яке закривається тільки на час передачі даних. Це дозволяє використовувати їх для

вирішення завдань, що вимагають отримання великого обсягу даних. Цей клас пристроїв споживає найбільше енергії, тому зазвичай не використовує живлення від батареї, але отримує дані від мережевого сервера з найменшою затримкою. На рис. 2.2 представлена архітектура LoRaWAN мережах1 [8,13]. Класична мережа LoRaWAN складається з наступних елементів: кінцевих вузлів, шлюзів, мережевого сервера та сервера додатків. Кінцевий вузол (End-Node) призначений для виконання функцій контролю, керування та вимірювання. Він містить набір необхідних датчиків і елементів управління. Як правило, вони працюють від батарейок. Вузли вмикають передавач даних лише на певний проміжок часу (зазвичай 1-5 секунд), після чого відкриваються два часових вікна для прийому даних. В інший час приймач-передавач кінцевого вузла знаходиться або в неактивному стані, або в стані прийому, в залежності від класу пристрою (А, В або С).

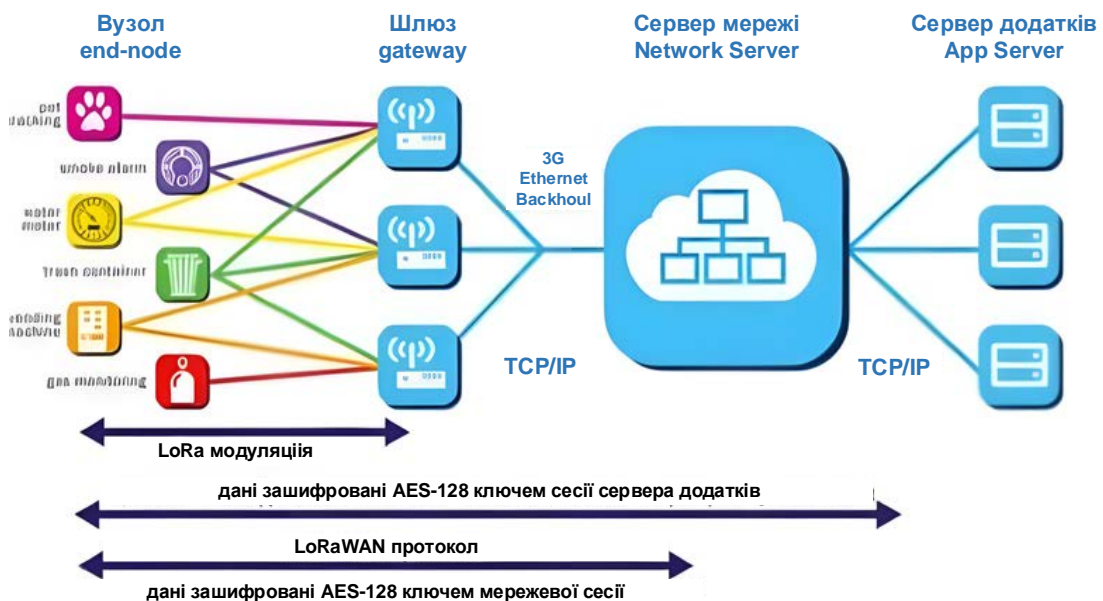


Рисунок 2.2 – Мережева архітектура LoRa

Пристрій, який отримує дані від кінцевих пристроїв по радіоканалу і передає їх в магістральну мережу – шлюз LoRa Gateway/Concentrator. Магістральними мережами можуть бути Ethernet, WiFi, стільникові мережі та будь-які інші телекомунікаційні канали. Шлюз і кінцеві пристрої утворюють топологію мережі

«зірка». Часто пристрій складається з багатоканальних трансиверів для обробки сигналів по декількох каналах одночасно або навіть кілька сигналів в одному каналі. Відповідно, лише деякі з цих пристроїв забезпечують покриття мережі та прозору двонаправлену передачу даних між кінцевими вузлами та сервером. Network Server призначений для управління мережею: налаштування розкладу, адаптації швидкості, зберігання та обробки отриманих даних. Сервер додатків (Application Server) може віддалено контролювати роботу кінцевих точок і збирати з них необхідні дані. Мережа LoRa зазвичай має топологію «зірка», в якій пристрої підключаються через шлюзи LoRa, які, у свою чергу, підключаються до загального мережевого сервера (NetServer) через стандартні протоколи IP.

Модель трансивера LoRa була побудована на Matlab в середовищі Simulink з використанням фундаментальних компонентів Simulink, щоб продемонструвати, як можна економічно та ефективно побудувати надійні та складні схеми модуляції. Модель передавача-приймача LoRa з використанням модуляції FSK показана на рис.2.3.

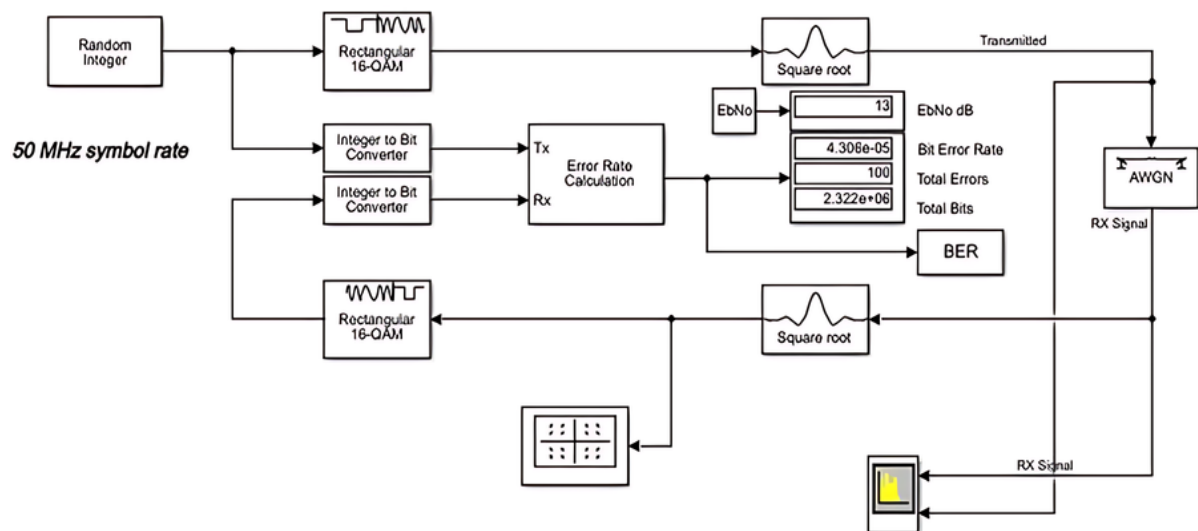


Рисунок 2.3 – Структурна схема передавача та приймача LoRa.

Передавач складається з 2-х блоків модуляції FSK, один для необхідного сигналу, а інший для проміжного сигналу. Обидва сигнали підсилюються за допомогою маломощного підсилювача, а потім розділяються на фазові складові

загального режиму і квадратури. Далі йде аналого-цифровий перетворювач, який на виході має цифровий сигнал. Цифровий приймач застосовує узгоджений фільтр до прийнятого сигналу, а також функцію AGC і демодулює форму сигналу для обчислення частоти помилок за символами.

Параметри, необхідні для моделювання передавача і приймача, наведені в таблиці 2.1. Використовуючи ці параметри (згідно зі специфікацією LoRa), можна отримати модель Simulink і отримані результати наведені нижче

Таблиця 2.1 - Параметри, що використовуються при моделюванні

| Визначення | Значення |
|--|---------------|
| Кадр даних (Data Frame) | 64 символи |
| Пов. на символ (Samples per Symbol) | 8 |
| Список фактора (Roll of Factor) | 0,2 дБ декада |
| Підвищення частоти (Up sampling) | 8 |
| Підсилення LNA (LNA power gain) | 18 дБ |
| Коефіцієнт шуму LNA (LNA noise figure) | 3 дБ |
| Імпеданс LNA (LNA Impedance) | 50 Ом |
| Фазовий зсув (phase shift) | 90° |
| Зниження частоти (down sampling) | 8 |
| Затримка (Receive delay) | 7 |

В результаті моделювання приймально-передавальної системи LoRa були отримані наступні результати. Як видно з рис. 2.4, зміни рівнів потужності сигналу і характеристик компонентів в приймачі і АЦП безпосередньо впливають на працездатність приймача.

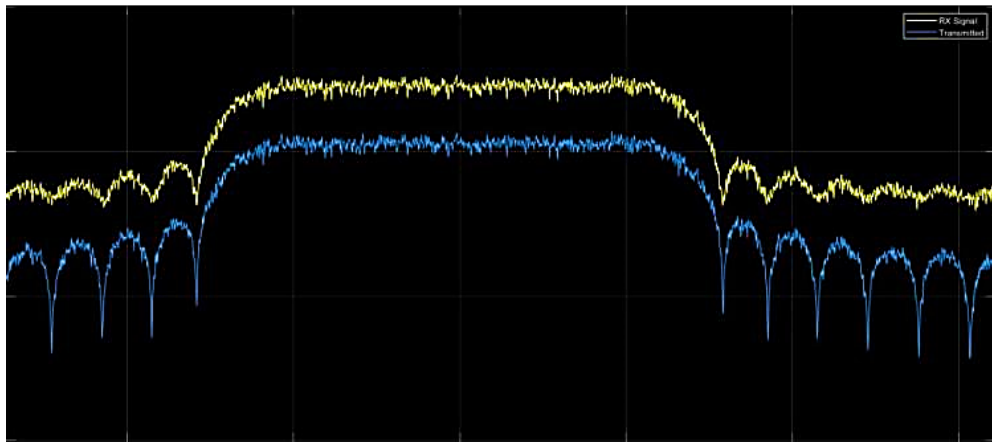


Рисунок 2.4 – Переданий та прийнятий сигнал

На рис. 2.4 видно, що переданий і прийнятий сигнали практично однакові, лише з незначним погіршенням прийнятого сигналу обумовленого завадами. Переданий сигнал і прийнятий сигнал приймаються на центральній частоті.

Технологія SigFox. SIGFOX – це приватна компанія, метою якої є створення всесвітньої мережі, спеціально розробленої для пристроїв (Internet of Things, IoT). Технологія дозволяє передавати дані на великі відстані при низькій потужності передавального пристрою і малій ємності акумулятора. Мережа чудово підходить для простих і автономних пристроїв, які надсилають невелику кількість даних у цю мережу. Таким чином, мережа SIGFOX схожа на стільникову мережу інфраструктури (GSM і GPRS-3G-4G), але вона більш енергоефективна і в той же час менш витратна. SIGFOX використовує Ultra Narrow Band (UNB) на основі радіотехнології для підключення пристроїв до глобальної мережі. Використання UNB є ключовим фактором у забезпеченні дуже низького рівня потужності передавача, який буде використовуватися під час надійного стану з'єднання даних. Мережа працює в існуючих неліцензованих діапазонах (The industrial scientific and medical, ISM) в глобальному масштабі і співіснує на цих частотах з іншими радіотехнологіями без проблеми перекривання мережі або проблем з пропускнуою здатністю. У Європі широко використовується діапазон 868,8 МГц (як визначено в ETSI та CEPT), а в США 915 МГц (за визначенням FCC). Зона охоплення мережі SIGFOX становить близько 30-50 км у сільській та міській місцевості. Зазвичай, там, де більше завод і шуму, дальність зменшується від 3 до 10 км. На рис. 2.5

представлено топологію мережі технології SIGFOX [8,15]. Загальна топологія мережі була розроблена, щоб забезпечити масштабовану, високопродуктивну мережу з дуже низьким енергоспоживанням, зберігаючи при цьому просту і легку топологію зірки, засновану на стільниковій частині інфраструктури.



Рисунок 2.5 - Топологія мережі SIGFOX

У SIGFOX вузли можна використовувати у двох конфігураціях:

- режим P2P – прямий зв'язок між вузлами (інтерфейс LAN);
- гібридний режим – SIGFOX / P2P (P2P + GW в мережі SIGFOX).

У режимі P2P вузли можуть з'єднуватися безпосередньо між собою і відправляти повідомлення відразу, при цьому відправка буде безкоштовною, так як передача даних відбувається без транзитного каналу, за який доведеться платити. Це корисно тим, що в будь-який момент можна створити вторинні мережі і немає необхідності міняти прошивку, потрібно лише скористатися спеціальними командами поточної бібліотеки. У гібридному режимі ми використовуємо комбінацію режимів SIGFOX і P2P, що дозволяє надсилати лише певні повідомлення через мережу. У цьому випадку ми використовуємо один вузол як мережевий шлюз (режим P2P + SIGFOX), а решту вузлів у режимі P2P [7].

SIGFOX і ETSI визначили, що один пристрій може надсилати до 140 повідомлень на день, причому одне повідомлення містить максимум 12 байт корисної інформації. Було виявлено, що ці 12 байт покривають потреби пристроїв,

які передають такі дані, як коефіцієнт енергоспоживання, місцезнаходження пристрою, сигнал тривоги та інші основні види сенсорної інформації. Також є можливість відправляти на кожен пристрій до 4 повідомлень, що складаються з 8 байт корисної інформації в день. Ці 8 байт дозволяють відправляти дані про конфігурацію, а також оптимізувати час автономної роботи. Цього достатньо, якщо вам не потрібне повноцінне двостороннє підключення. Для того, щоб отримати повідомлення, пристрій повинен запросити дані з сервера, на які заздалегідь має бути запрограмовано певний час, наприклад, конкретна подія. Технологія використовує шифрування AES за допомогою HMAC з закритим ключем, вбудованим у пристрій, плюс деякий порядковий номер. Технологія SIGFOX націлена на недорогі пристрої, де потрібна широка зона покриття. Існує ряд застосувань, які потребують цієї бездротової технології. Сфери, в яких можуть використовуватися мережі SIGFOX, включають:

- будинки та споживчі товари;
- енергетичні комунікації - зокрема , розумний облік;
- охорона здоров'я – зокрема , додаток mHealth;
- транспорт – включаючи технічне управління;
- віддалений моніторинг та управління;
- торгова точка, сховище оновлень тощо;
- безпека[8].

Стандарт має ряд переваг перед іншими базовими мережевими технологіями LPWAN. Це велика зона покриття; висока проникаюча здатність; до 20 років роботи датчика від 2-х батарейок типу AA, тобто наднизьке енергоспоживання; низька вартість. Як і всі технології сучасного світу, енергоефективна мережа SIGFOX, на жаль, має і негативні характеристики:

- низька швидкість передачі даних;
- залежність від стільникової інфраструктури;
- обмежена стійкість до завад;

Технологія NB-IoT. NB-IoT має ряд переваг, таких як широка зона покриття, швидка модернізація існуючої мережі, низьке енергоспоживання, що гарантує 10-

річний термін служби батареї, низька вартість терміналу, plug and play, підвищена надійність і висока мережа безпеки операторського рівня. NB-IoT ідеально відповідає вимогам ринку LPWAN, дозволяючи операторам розширювати цю нову сферу. NB-IoT дозволяє сучасним операторам працювати з традиційними сферами IoT, такими як розумні системи обліку, відстеження, завдяки своїй наднизькій вартості, а також відкриває більше можливостей для промисловості, наприклад, розумного міста, систем електронної охорони здоров'я. Технологія NB-IoT розглядає еволюцію від індустрії стільникового зв'язку до Інтернету речей. Вузкосмуговий різновид малопотужних глобальних мереж з низьким енергоспоживанням, який в першу чергу призначений для додатків M2M. Стандарт NB-IoT був визначений угодою 3GPP у Release 13 (LTE Advanced Pro) і тестується з 2016 року. Нижче, на рис. 6 показано дев'ять галузей, де ми бачимо великий ринковий потенціал для послуг NB-IoT[8]:



Рисунок 2.6 - Цільові галузі для послуг NB-IoT

Наразі модель включає понад п'ятдесят варіантів використання, що охоплюють багато категорій послуг, таких як:

- розумний облік (електроенергії, газу та води);
- системи охоронної та пожежної сигналізації будинків та комерційних об'єктів;
- прилади для вимірювання параметрів здоров'я;
- стеження за людьми, тваринами або предметами;

- розумна міська інфраструктура, така як вуличні ліхтарі або системи контролю та обліку транспортних засобів;
- підключення промислових пристроїв, таких як зварювальні апарати або повітряні компресори. Як згадувалося раніше, сервіси, які використовують низьку потужність мережі, зазвичай вимагають широкого покриття та низького енергоспоживання, що є обов'язковою умовою майже 80% усіх випадків використання LPWAN.

Порівнюючи невід'ємні можливості NB-IoT з іншими технологіями LPWAN, такими як e-MTC, SIGFOX, LoRa, NB-IoT забезпечує більш високу продуктивність. Крім того, спостерігаючи за всіма технологіями з точки зору інвестицій в мережу, сценаріїв покриття, вхідного і вихідного трафіку, надійності мережі, можна зробити висновок, що NB-IoT є найбільш підходящою технологією. Відомо, що кілька операторів по всьому світу використовують діапазон частот 900 МГц для GSM через його широкі можливості. Це можливо тому, що такі низькочастотні діапазони мають відмінні характеристики поширення, і це, як правило, покращує проникнення в приміщення. Розгортання NB-IoT у частотних діапазонах, таких як 700, 800 і 900 МГц, є чудовим вибором, оскільки це досить велика екосистема, головним чином завдяки підтримці багатьох провідних світових операторів. Існує значна кількість комерційних мереж UMTS і LTE, які в даний час працюють в діапазоні частот 900 МГц. У 3GPP були запропоновані 3 сценарії розгортання LPWAN NB-IoT: Guard Band, In Band та Standalone. Мережа може бути розгорнута як автономний оператор з використанням будь-якого доступного спектру більше 180 кГц. Крім того, мережа може бути в розподілі спектру LTE, або як частина більш широкого оператора LTE InBand, або в LTE Guard Band.

Технологія Weightless P – це відкритий стандарт для високопотужних LPWAN, розроблених для продуктивності мережі. Special Interest Group (SIG) пропонує три різні протоколи – Weightless-H, Weightless-W і Weightless-P, які підтримують різноманітні форми та варіанти використання. Weightless-W – це відкритий стандарт, призначений для роботи на частотах телевізійного діапазону (TVWS). Weightless-W ідеально підходить для використання в нафтогазовій

промисловості. Weightless-N фокусується на надзвичайно широкому покритті замість високої швидкості передачі даних. Хоча він обмежений одностороннім комунікаційним трафіком. Weightless-N підтримує більший радіус дії та менше енергоспоживання. Weightless-N ідеально підходить для сенсорних мереж на основі датчиків температури, моніторингу рівня в резервуарі, вимірювань тощо. Weightless-P – це вузькосмугова технологія LPWAN для рішень IoT, які вимагають високої щільності кінцевих точок, тривалого часу автономної роботи та двонаправленого зв'язку. Особливостями цієї технології є масштабованість, оптимізація висхідного та низхідного каналів, широка зона покриття, тривалий час автономної роботи і безпечна мережа. Він використовує вузький діапазон груп модуляції, пропонуючи можливість двонаправленого зв'язку для забезпечення безпрецедентної якості обслуговування (QoS). На відміну від Weightless-N і -W, Weightless-P не вимагає температурної компенсації кварцового генератора (Temperature Compensated Crystal Oscillator, TCXO) завдяки широкому діапазону електромагнітного випромінювання (УВЧ). Weightless-P є найбільш масштабованою субгігагерцевою технологією LPWAN. Одна базова станція Weightless-P підтримує більше пристроїв, ніж будь-яка інша технологія LPWAN у діапазоні нижче ГГц. Висока потужність базових станцій мінімізує витрати на розгортання. Виділяють десять основних характеристик Weightless-P:

- вузькосмугова технологія (12,5 кГц на канал);
- оптимізація підтримки планових та позапланових трафік-рухів (у стандарті TDMA/FDMA);
- спектрально ефективна модуляція OQPSK
- працює у всьому діапазоні ліцензованих діапазонів частот ISM нижче ГГц для глобального розгортання: 169 / 433 / 470 / 780 / 868 / 915 / 923 МГц;
- роумінг;
- 2 км в міському середовищі;
- час синхронізації базових станцій для ефективного радіопланування ресурсів та їх використання;
- можливість спільного використання інфраструктури;

- адаптивна швидкість передачі даних: від 200 біт/с до 100 кбіт/с[7];
- моніторинг потужності передачі для низхідної та висхідної лінії з метою зменшення завад та збільшення пропускної здатності мережі. Ресурси в субгігагерцовому неліцензованому спектрі обмежені, а трафік від інших технологій неухильно зростає. Тому Weightless-P використовує вузькосмугові канали 12,5 кГц, що дає можливість передавати в 7 разів більше даних, ніж SIGFOX, і в 98 разів більше, ніж LoRaWAN, в міських умовах. Множинний доступ з часовим поділом (TDMA) – це метод доступу до каналів для мереж із загальним середовищем. Це дозволяє кільком користувачам використовувати один і той же частотний канал, розділяючи сигнал на різні часові інтервали. Множинний доступ з частотним розподіл (FDMA) – це ще один спосіб доступу до каналу, коли користувачам надається індивідуальний діапазон частот і координується доступ між кількома користувачами. Варто зазначити, що LoRaWAN та SIGFOX не є синхронними мережами. Двонаправлений зв'язок між кінцевими пристроями та базовою станцією з низькою затримкою забезпечує надійну мережа та продуктивність. Базова станція може мати повний контроль над своєю мережею та кінцевими пристроями в будь-який час. Для інших технологій кінцеві пристрої недоступні, доки пристрій не почне передавати дані через висхідний канал зв'язку. Кілька підканалів з низькою затримкою у висхідному та низхідному каналах зменшують час прийому, а також зменшують розряд батареї. Після того, як кінцевий вузол відправив дані, базова станція Weightless-P повідомляє кожному пристрою точний час і час використання, щоб уникнути зіткнень і забезпечити успішну доставку важливих даних. Як зазначалося раніше, зі зростанням трафіку в діапазоні субгігагерцового діапазону зростає ймовірність втрати або дублювання даних. LoRa і SIGFOX підходять до цього питання примітивно: повідомлення надсилаються кілька разів, перш ніж вони будуть успішно доставлені. Цей спосіб швидко розряджає батарею. Weightless-P побудований на особливостях надійності стільникових мереж: синхронна мережа забезпечує найвищу ймовірність успішного отримання даних за одну спробу. Метод адаптивної швидкості передачі даних забезпечує оптимальну продуктивність мережі та подовжує термін служби

батареї кінцевих пристроїв, регулюючи фактичну швидкість передачі даних залежно від близькості швидкості передачі даних і кожен вузол до базової станції. Чим ближче кінцеві вузли до базової станції, тим вища швидкість передачі даних, що призводить до скорочення ефірного часу та зниження вихідної потужності. Навпаки, вузли, які знаходяться найдалі від базової станції, використовують найнижчу швидкість передачі даних і найвищу вихідну потужність.

Технологія Weightless-P підтримується протоколом безпеки і забезпечує:

- взаємну автентифікацію з довіреною третьою стороною
- шифрування розмов;
- схема автентифікації EAP-GPSK як базова лінія.
- мережева автентифікація. Шифрування AES-128/256. Пряме

виправлення помилок.

Більш компактний і оптимізований протокол знижує складність і вартість системи в порівнянні зі стільниковим M2M або майбутнім NBІoT. Технологія активно використовується в інтелектуальних вимірюваннях, автомобільних системах стеження, відстеженні активів, в розумних автомобілях - діагностиці та модернізації транспортних засобів, моніторингу здоров'я, датчиках руху, розумних пристроях, розумній інфраструктурі електронних платежів тощо [8].

Висновки до другого розділу

У цьому розділі визначені основні характеристики мережі 5G, та проаналізовані їх відмінності від характеристик ІМТ. Проаналізований опис послуг сервісів мережі 5G та топологічне рішення для радіоінтерфейсів. Розглянутий взаємозв'язок мереж 5G та ІoT I LPWAN. Розроблена модель трансивера на пакеті прикладних програм Matlab в середовищі Simulink з використанням фундаментальних компонентів Simulink, щоб продемонструвати, як можна економічно та ефективно побудувати надійні та складні схеми модуляції.

3 МОДЕЛЬ ПРОДУКТИВНОСТІ ДЛЯ МЕРЕЖ 5G

3.1 Методи моделювання продуктивності для мереж 5G

У 5G, як і в інших системах бездротового зв'язку, адаптивна модуляція та кодування (AMC) стала стандартним підходом. Ідея AMC полягає в динамічній адаптації схеми модуляції та кодування до умов каналу таким чином, щоб досягти найвищої спектральної ефективності в будь-який час [16]. Таким чином, модуляція та/або кодування можуть змінюватися з часом для даного користувача залежно від його місцезнаходження та якості каналу. Це особливо актуально, коли користувачі мобільні, що підкреслює вплив мобільності на продуктивність користувачів і стільникових телефонів. Отримані коливання швидкості передачі використовуються опортуністичними планувальниками для збільшення загальної пропускної здатності даних [17]. Але навіть планувальники з чесною стратегією розподілу ресурсів можуть скористатися перевагами мобільності користувачів.

Про те, що мобільність може підвищити продуктивність, вже зазначалося в статтях [20]. У цих роботах в основному представлені теоретичні властивості і межі продуктивності. Наприклад, в роботі [20] автори виділяють два граничні режими нескінченно швидких і нескінченно низьких варіацій каналів, і показують, що ці граничні режими забезпечують підвищені обмеження продуктивності на рівні потоку. Крім того, він розробляє нижню і верхню межі для показників продуктивності на рівні потоку і показує, що мобільність має тенденцію до збільшення загальної пропускної здатності мережі. У [22] автори аналізують мережі з декількома базовими станціями, що зв'язуються, і показують, що мобільність збільшує область стійкості системи. Автори [25] моделюють систему OFDMA разом, використовуючи пропорційну справедливість (PF) та ієрархічну модуляцію (HM) за допомогою багатовимірного кола Маркова, і показують, що в присутності HM існує проста циклічна послуга, така як Round Robin, яка дає кращу продуктивність, ніж PF.

Найбільший інтерес представляє робота [6], в якій автори оцінюють вплив

мобільності користувачів на продуктивність стільникового зв'язку при справедливій і гнучкій схемі планування. Зокрема, вони показують, що в рамках обох політик планування мобільність збільшує пропускну здатність на межі стільника. Але оскільки марковський процес, який описує їхню модель, більше не є зворотнім в тому випадку, коли мобільні користувачі справедливо діляться ресурсами, вони можуть розробляти вирази замкнутої форми тільки в двох крайніх випадках, а саме, коли користувачі статичні і коли користувачі мають теоретичну нескінченну швидкість. Для отримання більш реалістичних швидкостей їх аналіз ґрунтується на чисельному рішенні багатовимірних кіл Маркова.

У цьому розділі представлено модифікатор для багатоканальної системи масового обслуговування (CMS) із загальним використанням ресурсів. Ця дисципліна обслуговування в англійській літературі називається Processor Sharing (PS).

На відміну від попередніх досліджень, наша модель не ґрунтується на чисельному аналізі складних марковських схем або на обмежувальних припущеннях, таких як нескінченна швидкість користувача, і як така є одним із перших простежуваних і точних наближень для стільникових мереж 4G/5G з мобільними користувачами. Наукова новизна підхід полягає у відокремленні моделі мобільності від самої моделі комірки шляхом зв'язування вхідних параметрів черги PS з параметрами фізичної мобільності. Показано, що розроблена модель узгоджується з наведеними вище аналітичними межами для реальних швидкостей користувачів. Застосовуючи цю модель, можна кількісно оцінити приріст швидкості як на продуктивність стільника, так і на продуктивність кінцевого користувача, а також дослідити вплив внутрішньостільникової та міжстільникової мобільності.

3.2 Системні та транспортні припущення

Розглянемо макрокомірку 5G з дисципліною кругового планування. При заданому числі активних користувачів ресурси розподіляються порівну між

користувачами. Користувач, який знаходиться один в комірці, буде мати різні швидкості передачі даних, якщо він знаходиться близько до базової станції. Таким чином, комірки можуть бути розділені на J зони однакових умов радіозв'язку або класів, кожна з яких характеризується досяжною потужністю, тобто пропускнуою здатністю, яка може бути досягнута користувачем при плануванні базової станції. Користувач класу j , $j = 1, \dots, J$, тобто присутній в даний момент в зоні j , отримує смугу пропускання C_j , якщо він знаходиться один у всій комірці. Навіть якщо це не є необхідним для розвитку нашої роботи, можна припустити, як в [28], що зони J утворюють концентричні кола радіуса R_j , де зона 1 - центральна зона, а зона J - периферійна зона.

Припустимо, що вимоги до зв'язку надходять в комірку відповідно до пуассонівського процесу швидкості Λ . Припустимо, що користувач, який передає новий запит на підключення, має ймовірність того, що p_j спочатку буде класу j і, таким чином, почне своє завантаження в зоні j . В результаті в зону j надходять нові вимоги до пуассонівського з'єднання зі швидкістю $\Lambda_j = p_j \Lambda$.

На відміну від попередньої класичної роботи над моделями черг PS, ми припускаємо, що користувачі мобільні і, таким чином, можуть змінювати зону в момент завантаження або залишати комірку до завершення передачі. Розглянута нами модель мобільності виглядає наступним чином. Важливо підкреслити, що це модель фізичної мобільності користувачів, яка відокремлена від використання ресурсів коміркою користувача. Позначимо його через Θ_j час фізичного перебування користувача в зоні j кожного разу, коли він відвідує зону, тобто час, протягом якого він фізично перебуває в зоні j , починаючи з моменту його появи в зоні j (або тому, що він починає завантажувати свій CU в зону J , або тому, що він входить в зону J з іншої сусідньої зони або комірки) і закінчується, коли він залишає зону J (все ще активна чи ні) в іншу сусідню зону або назавжди залишає комірку. Потім ми визначаємо P_{jk} , ймовірність того, що користувач, який фізично (тобто активний чи ні) існує в зоні j , переміститься в сусідню зону k . Якщо зовнішня сторона комірки позначена 0, P_{j0} - ймовірність того, що користувач вийде з комірки з зони j , а P_{0j} - ймовірність того, що користувач увійде у комірку з зони j .

Зауважте, що коли зони утворюють концентричні кола, користувачі можуть покинути комірку лише та увійти до неї із зони J.

Передбачається, що кожен новий запит на підключення (незалежно від його початкового класу) дає рівномірно розподілену кількість Σ завантажених даних. Як тільки надходить новий запит, він починає нову передачу даних (в зоні, де з'являється запит). Ця передача завершується або тому, що користувач завершив передачу перед виходом із комірки (незалежно від кількості зон, які він відвідав протягом цього часу), або тому, що він покинув комірку до того, як передачу було завершено. В результаті об'єм фактично переданих даним користувачем в комірці, в середньому менше Σ .

У даній роботі ми вважаємо, що випадкові величини Σ і Θ_j розподілені експоненціально. Перше припущення необхідне для наступних висновків. Насправді, а також через властивість відсутності експоненціальної розподільної пам'яті, припущення про експоненціальний обсяг дозволяє нам забути про кількість даних, вже переданих користувачем у попередніх зонах, поки він ще активний і переміщається в іншу зону. Це значно спрощує аналіз. З іншого боку, припущення про експоненціальний час перебування в кожній зоні зроблено лише для простоти, і можна розглянути інші більш реалістичні розподіли.

Тепер розглянемо окремий випадок, коли зони J утворюють концентричні кола радіуса R_j , і подивимося, як ми можемо оцінити параметри руху і рухливості. По-перше, поверхня зони j дорівнює $S_j = \pi(R_j^2 - R_{j-1}^2)$, коли $j > 1$ та $S_1 = \pi R_1^2$. Якщо надходження нових заявок на підключення рівномірно розподілено по всій поверхні стільника, то імовірність p_j того, що в зоні j з'явиться нова заявка на підключення, пропорційна поверхні зони j:

$$p_j = \frac{S_j}{\pi R_j^2} \quad (3.1)$$

Що стосується середнього часу перебування в зоні j, $E(\Theta_j)$, то можна обґрунтовано припустити, що він пропорційний квадратному кореню з поверхні

зони і обернено пропорційний швидкості V користувачів:

$$E(\Theta_j) = K \frac{\sqrt{S_j}}{V}. \quad (3.2)$$

Коли зони утворюють концентричні кола, користувач, фізично існуючий в зоні j , $j = 2, \dots, J-1$ має ймовірність $P_{j,j-1}$ переміститися в зону $j-1$ і ймовірність $P_{j,j+1}$ переміститися в зону $j+1$ (в якій, звичайно, $P_{j,j-1} + P_{j,j+1} = 1$). Для зони 1, очевидно, $P_{1,2} = 1$. А із зони J користувач може або повернутися в зону $J-1$ з ймовірністю $P_{J,J-1}$, або вийти з комірки з ймовірністю $P_{J,0}$. Всі ці ймовірності явно залежать як від радіуса зон R_j , так і від фактичної мобільності користувачів. Однак, не роблячи додаткових припущень про фізичну мобільність користувачів, можна використовувати наступне наближення:

$$P_{j,j-1} = \frac{R_{j-1}}{2R_j}, \quad j > 1. \quad (3.3)$$

Це лінійне наближення, яке враховує очевидні межі коли:

$$R_{j-1} \rightarrow 0, \quad P_{j,j-1} \rightarrow 0 \quad \text{і коли} \quad R_{j-1} \rightarrow R_j, \quad P_{j,j-1} \rightarrow \frac{1}{2}.$$

Зауважимо, що ймовірності p_j і P_{ij} , а також середній час перебування $E(\Theta_j)$ є вхідними даними для моделі черги PS. Будь-які альтернативні вирази, отримані з реалістичної моделі фізичної мобільності користувача, можуть бути використані як взаємозамінні, не змінюючи розробку, представлену нижче.

3.3 Модель

Для простоти в цьому розділі розглянемо комірку як ізольовану від зовнішнього світу, і явно не враховуємо активних користувачів, які передають дані з сусідніх комірок.

Модель являє собою заповнення комірки багатокласовою спільною чергою процесора, як показано на рисунку 3.1. Кожному класу відповідає певна зона комірки. Клієнти класу j стоять у черзі за пуассонівським процесом швидкості λ_j , $j = 1, \dots$. Важливо відзначити, що, на відміну від [9], λ_j відрізняється від частоти Λ_j нових запитів на підключення, що з'являються в зоні j , так як вона повинна включати прихід користувачів, які переходять з іншої зони, залишаючись активними. Якщо позначити через Λ_{ij} середнє число активних користувачів, що переміщуються з зони i в зону j за одиницю часу, Тоді отримуємо:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \Lambda_1 + \Lambda_{21} \\ \lambda_j = \Lambda_j + \Lambda_{j-1j} + \Lambda_{j-1j}, j = 2, \dots, J-1. \\ \lambda_J = \Lambda_J + \Lambda_{J-1J} \end{cases} \quad (3.4)$$

Зауважимо, що послаблення припущення про те, що клітина ізольована від зовнішнього світу, полягало б у додаванні до λ_J доданка, який би представляв швидкість активних користувачів, що передають дані ззовні. На даний момент ми можемо просто припустити, що ця швидкість є частиною передбачувано відомої швидкості Λ_J нових вимог до з'єднання, що виникають в зоні J .

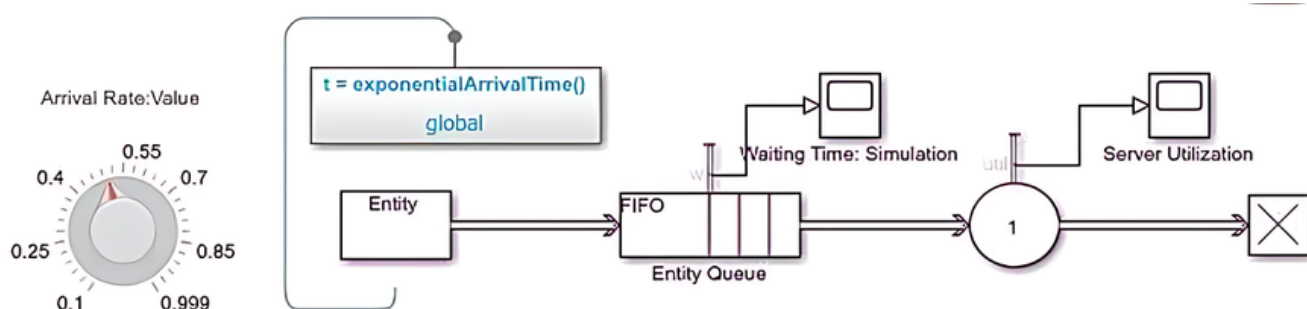


Рисунок 3.1 – Модель черги PS

Швидкість класу j , в свою чергу, може бути виражена як:

$$\mu_j = \frac{C_j}{\bar{x}_j}, \quad (3.5)$$

де x_j визначається як середнє число бітів, переданих активним користувачем в зоні j за кожне відвідування зони, тобто між моментом, коли він входить в зону (або з'являється в зоні) і моментом, коли він виходить (або закінчує свою передачу в зоні).

Перш ніж продовжити, важливо підкреслити, що черга PS завжди стабільна, тобто для цієї системи не існує умови стабільності. Інтуїтивно це можна пояснити тим, що всі користувачі мобільні і в кінцевому підсумку покинуть осередок через обмежений час. Коли швидкість новинного зв'язку зростає і прагне до нескінченності, користувачі з більшою ймовірністю покинуть комірку до завантаження одного біта.

У підсумку нам потрібно обчислити всі вхідні параметри черги PS, а саме λ_j і μ_j , для $j = 1, \dots, J$, або, точніше, всіх Λ_{ij} і x_j .

З огляду на параметри λ_j і μ_j , стандартні результати для стаціонарних багатокласових черг спільного використання процесорів можуть бути легко застосовані для обчислення середньої пропускної здатності γ_j , одержуваної користувачами в зоні j при їх передачі, тобто.

$$\bar{\gamma}_j = C_j(1 - \rho) \quad (3.6)$$

$$\text{де } \rho = \sum_{j=1}^J \rho_j \text{ і } \rho_j = \frac{\lambda_j}{\mu_j}.$$

Для оцінки перших відсутніх параметрів x_j , необхідних у виразі μ_j , використовуємо методику, розроблену в [9] для однозонних стільників і застосовуємо її до кожної зони окремо. В окремому випадку, коли Σ і Θ_j розподілені експоненціально, x_j відноситься до середньої пропускної здатності γ_j , отриманого користувачами в зоні j , і до середнього часу $E(\Theta_j)$, який користувач

фізично проводить у зоні j , оскільки:

$$\bar{x}_j = \frac{E(\Xi)E(\Theta_j)\bar{\gamma}_j}{E(\Xi) + E(\Theta_j)\bar{\gamma}_j}. \quad (3.7)$$

Тепер нам потрібно оцінити відсутні параметри Λ_{ij} , які фігурують у виразах λ_j . Якщо позначити через h_j ймовірність перенесення сервісу із зони j , тобто ймовірність того, що активний користувач в зоні j покине зону, не завершивши свого перенесення, то можна виразити $\Lambda_{j,j+1}$ і $\Lambda_{j,j-1}$ як:

$$\begin{cases} \Lambda_{jj+1} = \lambda_j h_j P_{jj+1}, j = 1, \dots, J-1 \\ \Lambda_{jj-1} = \lambda_j h_j P_{jj-1}, j = 1, \dots, J \end{cases}. \quad (3.8)$$

Ймовірності передачі h_j можна виразити наступним чином:

$$h_j = \int_0^{+\infty} P\left[\Theta_j \leq \frac{y}{\bar{\gamma}_j}\right] f_{\Sigma}(y) dy. \quad (3.9)$$

Якщо припустити, що Σ і Θ_j розподілені експоненціально, то попередній інтеграл легко дає:

$$h_j = \frac{E(\Xi)}{E(\Xi) + E(\Theta_j)\bar{\gamma}_j}. \quad (3.10)$$

У підсумку отримаємо систему з 6 залежних рівнянь (3.4-3.8, 3.10), які будуть вирішуватися за допомогою ітераційного методу з фіксованою комою.

Якщо деякі користувачі можуть вийти з комірки, не завершивши передачу, нормально припустити, що деякі користувачі можуть увійти в комірку ззовні, при цьому деякі дані залишаються для передачі. Для обліку зовнішніх службових передач можна просто додати до швидкості λ_J зовнішньої зони комірки швидкість користувачів, що передають послуги ззовні, що позначається як Λ_{0J} :

$$\lambda_J = \Lambda_J + \Lambda_{J-1J} + \Lambda_{0J}. \quad (3.11)$$

Тепер виникає питання: як можна оцінити Λ_{0J} ? Згадане раніше рішення про те, що Λ_{0J} є відомим вхідним параметром, не є задовільним. Запропоновано альтернативне рішення, яке полягає в припущенні, що розглянуті клітини беруть участь в мережі статистично еквівалентних клітин. Якщо це правда, то Середнє число активних користувачів в одиницю часу, які переносять дані з комірки в зовнішнє середовище, має дорівнювати середньому числу активних користувачів в одиницю часу, які переносять дані із зовнішнього середовища в комірку. Тобто має бути $\Lambda_{0J} = \Lambda_{J0}$, і ця величина може бути просто пов'язана з ймовірністю передачі зони J розглянутої комірки як: $\Lambda_{J0} = \lambda_J h_J P_{J0}$. В результаті, для обліку комірки, що бере участь в мережі еквівалентних комірок, останнє рівняння системи (3.4) необхідно замінити на:

$$\lambda_J = \frac{1}{1 - h_J P_{J0}} (\Lambda_J + \Lambda_{J-1J}). \quad (3.12)$$

Однак важливо відзначити, що ця система, яка враховує зовнішні передачі, не завжди стабільна. Умова стійкості даної системи не залежить від швидкості V користувачів і еквівалентно умові стійкості системи, в якій користувачі мають нескінченну швидкість. Вона може виражатися в наступному: $\Lambda < \frac{C_\infty}{E(\Sigma)}$, де C_∞ –

еквівалентна потужність системи, в якій користувачі мають нескінченну швидкість.

Тепер ми можемо вивести з моделі продуктивність активного користувача в комірці, про яку йде мова. По-перше, можна перемалювати модель черги PS, як показано на рис. 3.2 для окремого випадку $J=2$, наочно показуючи цикли зворотного зв'язку активних користувачів, які виконують передачі послуг з однієї зони в іншу, і активних користувачів, що надходять ззовні.

Позначається λ як сумарна швидкість запитів на з'єднання в комірці. λ відрізняється від частоти Λ нових запитів на підключення, які з'являються у комірці, оскільки вона має включати користувачів, які переміщуються з-за меж комірки, залишаючись активними: $\lambda = \Lambda + \Lambda_{0J} = \Lambda + \Lambda_{J0}$. (3.13) Виходячи з класичних результатів черги PS, ми можемо розрахувати середню кількість клієнтів кожного класу, що відповідає середній кількості активних користувачів у кожній зоні:

$$\bar{Q}_j = \frac{\rho_j}{1 - \rho}. \quad (3.14)$$

Закон Літтла полягає в тому, що середній час R , проведений активним користувачем у комірці, починаючи з моменту, коли в комірці з'являється новий активний користувач (або через нову вимогу підключення, або через перенесення активного користувача ззовні) і закінчується, або коли користувач завершує свою передачу в комірці перед тим як залишити її, або залишає комірці до завершення своєї передачі:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{j=1}^J \bar{Q}_j}{\lambda}. \quad (3.15)$$

Після цього q_j визначається як ймовірність того, що активний користувач знаходиться в зоні j :

$$q_j = \frac{\bar{Q}_j}{\sum_{j=1}^J \bar{Q}_j}. \quad (3.16)$$

Далі потрібно розрахувати середню пропускну здатність $\bar{\gamma}$, отриману активним користувачем за весь час його перебування в комірці:

$$\bar{\gamma} = \sum_{j=1}^J q_j \bar{\gamma}_j. \quad (3.17)$$

З $\bar{\gamma}$ і R можна вивести \bar{X} , сумарну кількість бітів, переданих в середньому користувачем за весь час його перебування в комірці:

$$\bar{X} = \bar{\gamma} R. \quad (3.18)$$

Звичайно ж, $\bar{X} \leq E(\Sigma)$.

Нарешті, оцінюється глобальна ймовірність передачі H , тобто ймовірність того, що активний користувач покине комірку до того, як його передача буде завершена, незалежно від кількості зон, які він відвідав за цей час. H обчислюється як відношення між середньою кількістю активних користувачів, які покинули комірку за одиницю часу (із зони J), і загальною кількістю нових активних користувачів, що входять у комірку за одиницю часу:

$$H = \frac{\bar{Q}_j \frac{P_{J0}}{E(\Theta_J)}}{\lambda}. \quad (3.19)$$

3.4 Межі продуктивності

Продуктивність даної системи, коли мобільні користувачі фізично рухаються з деякою швидкістю V , обмежена продуктивністю двох систем. У першому випадку

користувачі статичні ($V = 0$), а в другому - мають нескінченну швидкість ($V = \infty$)

1 Модель, що відповідає першій системі, де користувачі статичні, являє собою класичну багатокласову чергу PS з параметрами $\lambda_j = \Lambda_j$ і $\mu_j = \frac{C_j}{E(\Sigma)}$. Відомо, що

вона еквівалентна однокласовій черзі PS зі швидкістю надходження $\lambda = \sum_{j=1}^J \lambda_j$ і

швидкістю обслуговування μ , що дорівнює середньому гармонійному значенню

кожної швидкості обслуговування: $\frac{1}{\mu_s} = \sum_{j=1}^J \frac{p_j}{\mu_j}$, p_j – імовірність нового запиту на

підключення в зоні j .

Це відповідає стільнику з однією зоною, що має еквівалентну ємність C_s , рівну середньому гармонічному C_j .

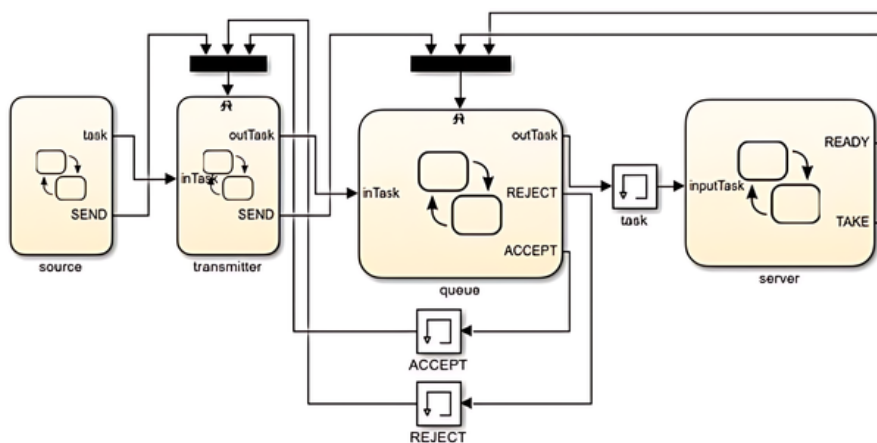


Рисунок 3.2 – Ілюстрація передачі даних між зонами та поза ними

$$\frac{1}{C_s} = \sum_{j=1}^J \frac{p_j}{C_j}. \quad (3.20)$$

У цій системі статичні користувачі отримують середню пропускну здатність $\bar{\gamma}_s$ в момент їх передачі, що задається формулою:

$$\bar{\gamma}_s = C_s(1 - \rho), \quad (3.21)$$

де $\rho = \frac{\lambda}{\mu_s}$, до тих пір, поки виконується умова стійкості $\lambda < \mu_s$. Рис. 3.3

ілюструє цю першу межу червоним кольором. Друга система, де користувачі мають нескінченну швидкість, еквівалентна однокласній черзі зі швидкістю прибуття,

$\lambda = \sum_{j=1}^J \lambda_j$, а швидкість обслуговування μ_∞ дорівнює середньому арифметичному

для кожної швидкості обслуговування: $\mu_\infty = \sum_{j=1}^J \alpha_j \mu_j$, де $\mu_j = \frac{C_j}{E(\Sigma)}$ і α_j –

ймовірність, що користувач фізично знаходиться в зоні j (активний чи ні) і задається формулою:

$$\alpha_j = \prod_{i=1}^{j-1} \frac{E(\Theta_{i+1})P_{ii+1}}{E(\Theta_i)P_{i+1i}} \alpha_1, \quad j = 2, \dots, J. \quad (3.22)$$

На рис. 3.3 синім кольором зображена ця друга межа, що відповідає черзі PS з еквівалентною пропускну здатністю C_∞ і середньою пропускну здатністю користувача γ_∞ заданої формулою:

$$C_\infty = \sum_{j=1}^J \alpha_j C_j \quad \text{і} \quad \bar{\gamma}_\infty = C_\infty \left(1 - \frac{\Lambda E(\Xi)}{C_\infty} \right). \quad (3.23)$$

Продуктивність системи, в якій користувачі мають задану швидкість V , наприклад, пропускну здатність, отриману користувачами, коли вони знаходяться в комірці, лежить між цими двома межами. Як показано на рис. 3.4, пропускну здатність починається з C_V , коли навантаження дуже мале, і сходиться до межі

$\frac{C_\infty}{E(\Sigma)}$ (для будь-якої швидкості V) при дуже високому навантаженні. Для того щоб

обчислити значення C_V , розглянемо неперервне часове коло Маркова, показане на

рис. 3.5 (для $J = 4$ зон) і моделює поведінку системи, що подається на дуже низьке навантаження, тобто, коли в комірці не більше одного клієнта. j -стани цього неперервного часового кола Маркова відповідають одному клієнту в зоні j , а стан 0 – порожній системі.

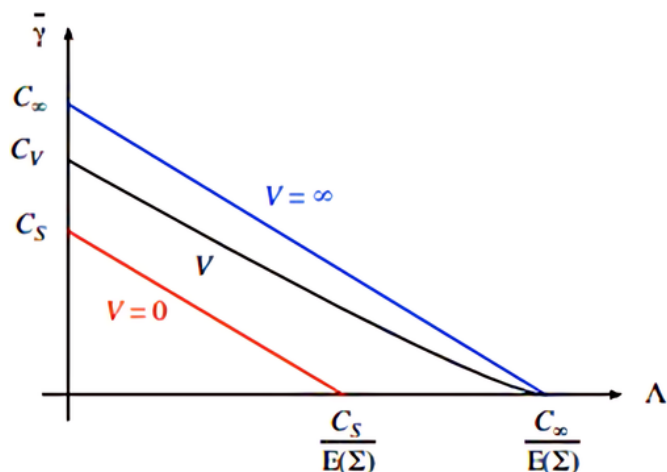


Рисунок 3.3 – Межі смуги пропускання, отримані користувачами в комірці

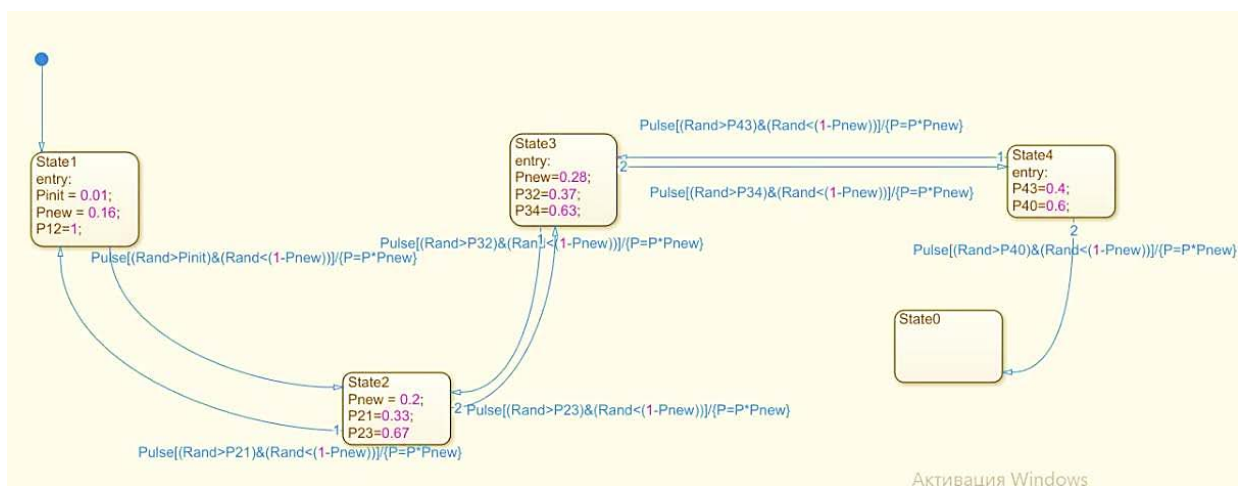


Рисунок 3.4 – Неперервне часове коло Маркова

C_V можна виразити з стаціонарної ймовірності π_i цього неперервного часового кола Маркова, як у відношенні (3.24), і відповідає середній арифметичній ємності C_j зважених на ймовірностях β_j , що активний користувач (імовірно, один у комірці) знаходиться в зоні J :

$$C_V = \sum_{j=1}^J \beta_j C_j, \quad (3.24)$$

$$\text{де } \beta_j = \frac{\pi_j}{\sum_{i=1}^J \pi_i}, \quad j = 1, \dots, J.$$

Слід зазначити, що результат не залежить від швидкості появи δ в цьому неперервному часовому колі Маркова. Нарешті, можна легко перевірити, що для будь-якої швидкості V користувачів: $C_S < C_V < C_\infty$, $C_V \rightarrow C_S$ при $V \rightarrow 0$ і $C_V \rightarrow C_\infty$ при $V \rightarrow \infty$.

3.5 Наскрізна продуктивність користувачів

Розглянуто випадок мережі статистично еквівалентних комірок і визначено наскрізну продуктивність мобільних користувачів, можливо, здійснюючи передачу даних всередині та між комірками. Оскільки передбачається, що розмір даних, що передаються користувачами, розподіляється експоненціально, коли користувач виконує передачу і залишає комірку, не завершивши її передачу, дані, що залишилися для перенесення, мають такий самий розподіл, як і вихідні (без властивості пам'яті експоненціального розподілу). В результаті, кількість n_h передач, які користувач повинен виконати, і кількість n_c комірок, які користувач повинен відвідати до завершення своєї передачі, геометрично розподіляються з параметром H (починаючи з 0 для першого і з 1 для другого), з представленими засобами:

$$\bar{n}_h = \frac{H}{1-H} \quad \text{і} \quad \bar{n}_c = \frac{1}{1-H}. \quad (3.25)$$

Вказується тривалість процедури передачі, тобто тривалість переривання обслуговування при зміні користувачем комірки. Використовуючи співвідношення (3.26), можна оцінити середній час носкрізної передачі \bar{T} користувача, який визначається як середній час, необхідний користувачеві для повного завершення

передачі, незалежно від кількості комірок і кількості зон у кожній комірці, які користувач відвідав під час передачі:

$$\bar{T} = \bar{n}_c \bar{R} + \bar{n}_h t_h. \quad (3.26)$$

Нарешті, виходить середня наскрізна пропускна здатність \bar{G} , яку отримує користувач під час повної передачі, як:

$$\bar{G} = \frac{E(\Sigma)}{\bar{T}}. \quad (3.27)$$

3.6 Результати досліджень

Результати, представлені моделями, порівнюються з результатами, отриманими за допомогою розробленого дискретного симулятора подій, розробленого в Matlab. Передбачається, що стільник використовує 100 блоків Resource для низхідної лінії зв'язку і пропонує користувачам чотири MCS (28, 23, 16, 6). В результаті утворюються чотири зони передачі з відповідною смугою пропускання $C_1 = 25$ Мбіт/с, $C_2 = 23$ Мбіт/с, $C_3 = 20$ Мбіт и $C_4 = 18$ Мбіт [9].

Встановлена константа $K = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$ і прийнята $E(\Sigma) = 10$ МБ для середнього обсягу

даних, що передаються всіма користувачами. Використовуваний радіус наступний, що відповідає моделі кіл концентричних комірок: $R_1 = 100$ м, $R_2 = 150$ м, $R_3 = 200$ м і $R_4 = 250$ м, R_4 приблизно відповідає робочій смузі LTE-антени в міських умовах. Середній час перебування в кожній зоні $E(\Theta_j)$ задається рівнянням (3.2). Виходячи з оцінок, наведених у розділі 3.3, результуюча ймовірність представлена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри комірки

| Параметри | Зона 1 | Зона 2 | Зона 3 | Зона 4 |
|-----------------------------------|------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Нові ймовірності приєднання p_j | 0.16 | 0.20 | 0.28 | 0.36 |
| Ймовірності переміщення P_{ij} | $P_{12}=1$ | $P_{21} = 0,33$ $P_{23} = 0,67$ | $P_{32} = 0,37$ $P_{34} = 0,63$ | $P_{43} = 0,40$ $P_{40} = 0,60$ |

На рис. 3.4, 3.5 і 3.6 відповідно показано порівняння пропускної здатності користувачів, ймовірності передачі обслуговування та часу перебування користувачів у відповідній комірці, залежно від загальної швидкості надходження нових з'єднань. Обрані різні значення швидкості V .

Видно, що прогнозована модель дуже близька до результатів моделювання. Середня відносна похибка між характеристиками, передбаченими моделлю, і результатами, отриманими за допомогою моделювання, становить в середньому близько 8%, а в гіршому випадку похибка залишається менше 22%.

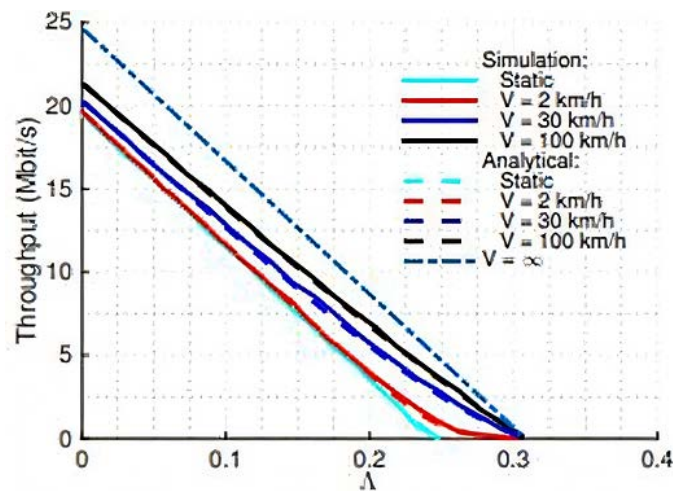


Рисунок 3.5 – Пропускна здатність, одержувана активними користувачами в залежності від загальної швидкості надходження нових вимог до підключення

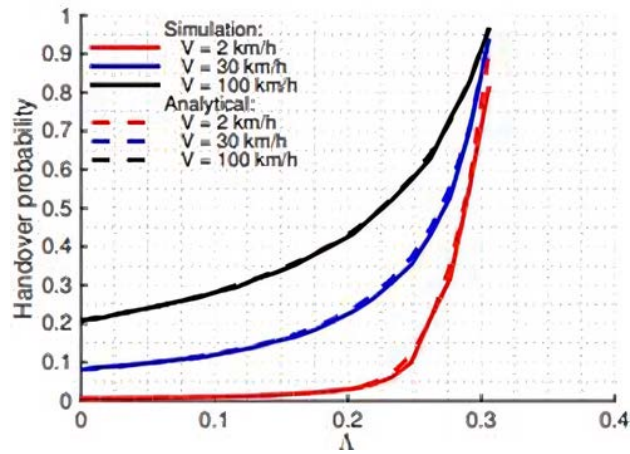


Рисунок 3.6 – Імовірність передачі обслуговування в залежності від загальної швидкості надходження нових запитів на підключення.

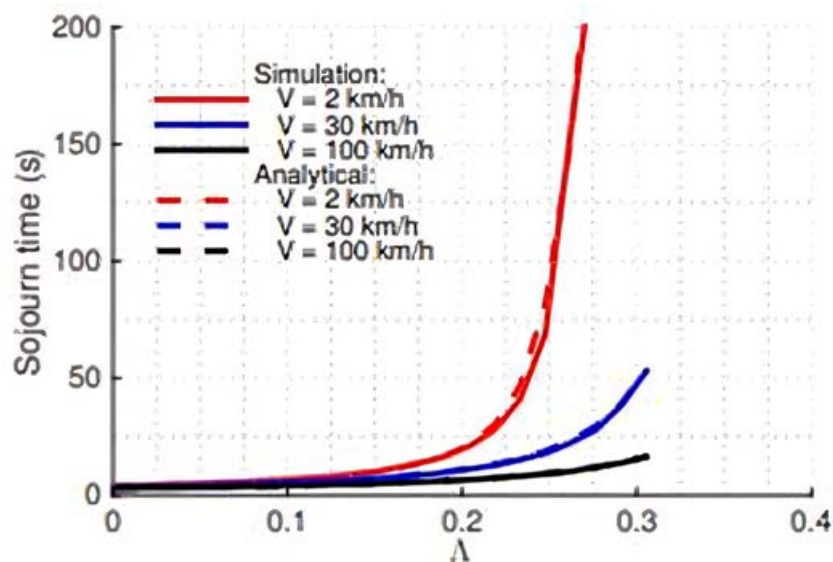


Рисунок 3.7 – Середній час перебування в розглянутій комірці як функція загальної швидкості надходження нових з'єднань.

Як пояснювалося в розділі 3.4, пропускна здатність мобільних користувачів (рис. 3.4) обмежена пропускною здатністю, отриманою, коли всі користувач статичні (нижня межа), і пропускною здатністю, одержаною з нескінченною швидкістю (верхня межа). Як і очікувалося, мобільність користувачів покращує час перебування користувачів (рис. 3.6), пропускну здатність C_V , і стабільність користувачів, тобто $<0,24$ для системи зі статичними користувачами та $<0,30$, коли користувачі мобільні. В останньому випадку умова стабільності не залежить від швидкості користувача. Причина цього полягає в тому, що вигреш від переходу

користувачів з поганих каналів в хороші переважає втрати від користувачів, що рухаються в протилежному напрямку. Користувачі в сприятливих умовах мають більше шансів завершити свої передачі, перед тим як перейти в гірше місце.

Важливо відзначити, що дане поліпшення супроводжується збільшенням швидкості передачі послуги (рис. 3.5). Передача N починається з початкового значення, яке залежить від швидкості, і збільшується. N сходиться до 1, коли $\Lambda \rightarrow 0,30$.

Досліджена продуктивність кінцевих користувачів в системі. На рисунку 3.7 показана кількість відвіданих комірок у мережі як функцію від загальної швидкості надходження нових вимог до з'єднання для різних значень швидкості користувачів. Беручи до уваги рівняння (3.25) і рисунок 3.5, на кількість відвідуваних комірок сильно впливає швидкість користувачів, і вона все більше залежить від швидкості надходження нових вимог до підключення.

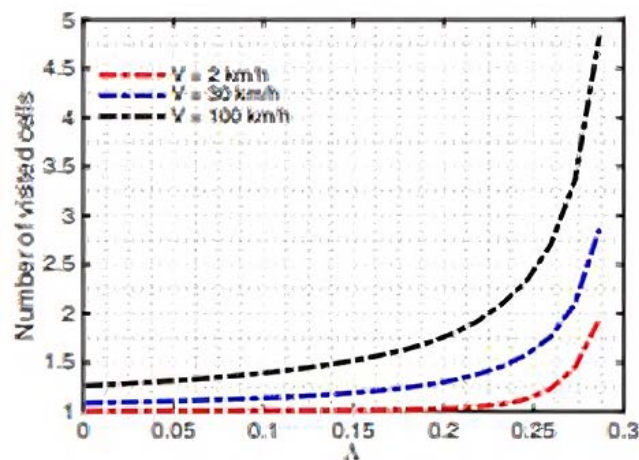


Рисунок 3.8 – Середня кількість відвіданих комірок в залежності від загальної швидкості надходження нових вимог до підключення

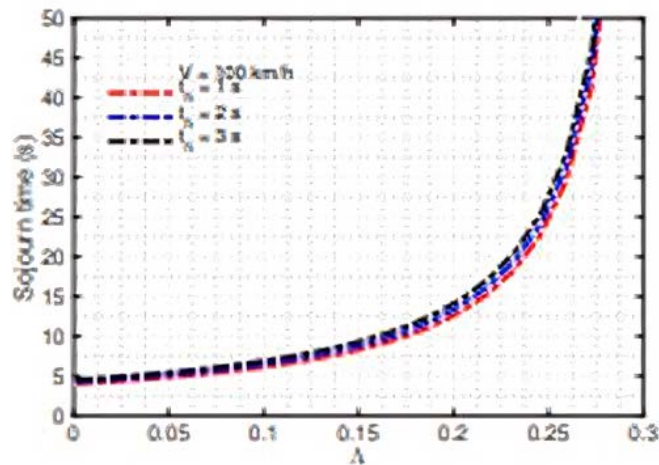


Рисунок 3.9 – Середній час перебування в мережі в залежності від загальної швидкості появи нових вимог до підключення

Оскільки в 5G підтримується лише жорстка передача обслуговування, час, необхідний для завершення передачі, має враховувати переривання обслуговування через процедури передачі обслуговування.

На рис. 3.8 показаний час, проведений користувачами в мережі (час, який є у користувача для завершення передачі), як і раніше в залежності від загальної швидкості надходження нових вимог до підключення Λ . Для тривалості процедури передачі вибираються три значення t_h (1с, 2с, 3с) і 100 км/год для швидкості користувача.

Час, необхідний користувачеві для завершення передачі, збільшується із загальною швидкістю надходження Λ . На цей час також впливає тривалість процедури передачі обслуговування.

Також розглядається вплив швидкості користувачів на продуктивність. На рис. 3.9 показана загальна швидкість надходження нових з'єднань $\Lambda = 0,15$, пропускна здатність як функція швидкості користувача. Слід зазначити, за цією кривою значний приріст мобільності порівнюється зі сценарієм, в якому всі користувачі є статичними. Зокрема, пропускна здатність мобільних користувачів є функцією збільшення швидкості, обмеженої статичною пропускною здатністю користувачів, і пропускною здатністю, отриманою в тому випадку, якщо користувачі мають нескінченну швидкість

Рис. 3.10 є аналогом рис. 3.9 з урахуванням тривалості переривання обслуговування через процедуру передачі, яка задається $2s$. Ця крива підкреслює вплив передачі обслуговування на збільшення пропускної здатності. Зокрема, для швидкості нижче 420 км/год мобільність призводить до збільшення пропускної здатності; а вище цього значення відбувається втрата пропускної здатності у порівнянні зі сценарієм лише зі статичними користувачами.

Ці числові результати показують, як швидкість передачі обслуговування врівноважує підвищення продуктивності на рівні потоку, і доводить, що приріст мобільності є немонотонною функцією швидкості користувача.

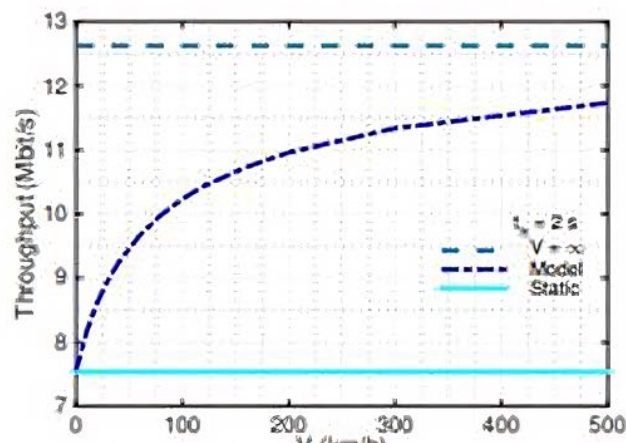


Рисунок 3.10 – Середня пропускна здатність, отримана активними користувачами в залежності від швидкості користувачів при $\Lambda = 0,15$.

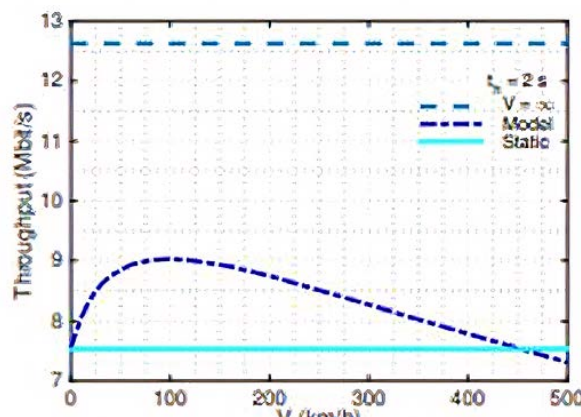


Рисунок 3.11 - Середня пропускна здатність, одержувана активними користувачами в залежності від швидкості користувачів з урахуванням переривання обслуговування через процедуру передачі даних при $\Lambda = 0,15$.

Висновок до третього розділу

Цей розділ присвячений розробці моделі черги масового обслуговування PS для оцінки продуктивності стільникових мереж передачі даних за допомогою політики циклічного перебору, яка враховує внутрішньо- і міжстільникову мобільність користувачів. Показано, що модель узгоджується з відомими аналітичними межами, що відповідають статичним користувачам або нескінченній швидкості, і забезпечує дуже хорошу точність для більш загальних швидкостей. Модель підтверджує, що мобільність може покращити продуктивність користувачів в даному стільнику і дозволяє кількісно оцінити вигоду. Він також забезпечує наскрізну продуктивність користувачів в мережі статистично еквівалентних комірок і показує, що продуктивність більше не є монотонною функцією швидкості.

4 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 «Мобільні мережі 5G із використанням волоконно - оптичних технологій» 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.

4.1 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 «Мобільні мережі 5G із використанням волоконно - оптичних технологій» 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. 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

| Ступінь новизни | Характеристика ступеня новизни | Значення ступеня новизни, бали | | |
|---|---|--------------------------------|----|----|
| | | Експерти (ПІБ, посада) | | |
| | | 1 | 2 | 3 |
| Принципово нова | Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод | 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 | 50 | 50 | 50 |
| 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) | 0 | 0 | 0 |
| 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 |
| Середнє значення балів експертів | | 50,0 | | |

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує

невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 4.2 – 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 | 60 | 60 | 60 |
| Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини | 0 | 0 | 0 |
| 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 |
| Середнє значення балів експертів | 60,0 | | |

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

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [30]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (4.1)$$

де $k_{\text{нов}}$, $k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 50,0$, $k_{\text{теор}} = 60,0$ балів;

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

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 50,0 + 0,4 \cdot 60,00 = 54,00 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{нау}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – 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 «Мобільні мережі 5G із використанням волоконно - оптичних технологій», даний рівень становить 54,00 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Мобільні мережі 5G із використанням волоконно - оптичних технологій», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

4.2.1 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 [30]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.2)$$

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, $T_p=21$ дні.

$$Z_o = 15780,00 \cdot 42 / 21 = 31560,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.4 – 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 науково-дослідної роботи | 15780,00 | 751,43 | 42 | 31560,00 |
| Ст. науковий співробітник | 15500,00 | 738,10 | 42 | 31000,00 |
| Консультант (фахівець служби підтримки функціонування 5G мереж) | 15000,00 | 714,29 | 10 | 7142,86 |
| Провідний фахівець | 9450,00 | 450,00 | 11 | 4950,00 |
| Всього | | | | 74652,86 |

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Мобільні мережі 5G із використанням волоконно - оптичних технологій» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.3)$$

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:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.4)$$

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

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [30];

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 $T_p = 21$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_i = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (21 \cdot 8) = 59,22 \text{ грн.}$$

$$Z_{p1} = 59,22 \cdot 6,20 = 367,18 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.5 – 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 |
|---|------------------------|---------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Налаштування робочого місця дослідника | 6,20 | 2 | 1,10 | 59,22 | 367,18 |
| Інсталяція програмного забезпечення моделювання та розробки | 5,75 | 4 | 1,50 | 80,76 | 464,36 |
| Компіляція моделі мережі 5G на основі оптичних технологій | 6,53 | 5 | 1,70 | 91,53 | 597,67 |
| Тренування моделі | 4,22 | 4 | 1,50 | 80,76 | 340,80 |
| Проведення цифрового експерименту | 7,25 | 3 | 1,35 | 72,68 | 526,95 |
| Формування бази даних результатів | 13,33 | 3 | 1,35 | 72,68 | 968,86 |
| Всього | | | | | 3265,84 |

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

$$Z_{\text{доп}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доп}}}{100\%}, \quad (4.5)$$

де $H_{\text{доп}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 11%.

$$Z_{\text{доп}} = (74652,86 + 3265,84) \cdot 11 / 100\% = 8571,06 \text{ грн.}$$

4.2.2 Відрахування на соціальні заходи

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

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{доо}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (4.6)$$

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

$$Z_n = (74652,86 + 3265,84 + 8571,06) \cdot 22 / 100\% = 19027,75 \text{ грн.}$$

4.2.3 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 «Мобільні мережі 5G із використанням волоконно - оптичних технологій».

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:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\epsilon j}, \quad (4.7)$$

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.

$$M_1 = 2,0 \cdot 176,00 \cdot 1,03 - 0 \cdot 0 = 362,56 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.6 – Витрати на матеріали

| Найменування матеріалу, марка, тип, сорт | Ціна за 1 кг, грн | Норма витрат, кг | Величина відходів, кг | Ціна відходів, грн/кг | Вартість витраченого матеріалу, грн |
|--|-------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Папір канцелярський офісний DATUM FZ 500-80 (A4) | 176,00 | 2,0 | 0 | 0 | 362,56 |
| Папір для заміток DATUM OFF 100-60 (A5) | 126,00 | 3,0 | 0 | 0 | 389,34 |
| Папір креслярський ВАТ-150 (A1) | 32,00 | 6,0 | 0 | 0 | 197,76 |
| Папір креслярський ВАТ-150 (A3) | 15,00 | 8,0 | 0 | 0 | 123,60 |
| Начиння канцелярське DATUM OZZ-5 | 176,00 | 3,0 | 0 | 0 | 543,84 |
| Органайзер офісний DATUM FAX-35 | 210,00 | 4,0 | 0 | 0 | 865,20 |
| Картридж для плотера (Canon JhR) | 580,00 | 1,0 | 0 | 0 | 597,40 |
| Картридж для принтера (Canon-1000) | 1560,00 | 1,0 | 0 | 0 | 1606,80 |
| Диск оптичний ВJR-3 (CD-R) | 21,00 | 2,0 | 0 | 0 | 43,26 |
| Диск оптичний ВJR-3W (CD-RW) | 29,00 | 4,0 | 0 | 0 | 119,48 |
| FLASH-пам'ять Kingdom 10 C (64 ГБ) | 189,00 | 2,0 | 0 | 0 | 389,34 |
| Всього | | | | | 5238,58 |

4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Мобільні мережі 5G із використанням волоконно - оптичних технологій», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (4.8)$$

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

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

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

$K_e = 1 \cdot 4329,00 \cdot 1,03 = 4458,87$ грн.

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.7 – Витрати на комплектуючі

| Найменування комплектуючих | Кількість, шт. | Ціна за штуку, грн | Сума, грн |
|----------------------------|----------------|--------------------|-----------|
| Макет вузла доступу 5G | 1 | 4329,00 | 4458,87 |
| Всього | | | 4458,87 |

4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

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

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{спец} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{пр.і} \cdot K_i, \quad (4.9)$$

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

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

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

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{спец} = 25699,00 \cdot 1 \cdot 1,08 = 27754,92 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

| Найменування устаткування | Кількість, шт | Ціна за одиницю, грн | Вартість, грн |
|-------------------------------|---------------|----------------------|---------------|
| Серверне обладнання 5G мережі | 1 | 25699,00 | 27754,92 |
| Всього | | | 27754,92 |

4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

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

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{прог} = \sum_{i=1}^k C_{инрг} \cdot C_{прог.і} \cdot K_i, \quad (4.10)$$

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

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

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

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прз}} = 5950,00 \cdot 1 \cdot 1,08 = 6426,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

| Найменування програмного засобу | Кількість, шт | Ціна за одиницю, грн | Вартість, грн |
|---|---------------|----------------------|---------------|
| Прикладний пакет Microsoft Office | 1 | 5950,00 | 6426,00 |
| Пакет Matlab 2020 з бібліотеками Simulink | 1 | 7560,00 | 8164,80 |
| Всього | | | 14590,80 |

4.2.7 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:

$$A_{\text{обл}} = \frac{Ц_{\text{б}}}{T_{\text{в}}} \cdot \frac{t_{\text{вик}}}{12}, \quad (4.11)$$

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

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

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

$$A_{обл} = (41599,00 \cdot 2) / (5 \cdot 12) = 1386,63 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

| Найменування обладнання | Балансова вартість, грн | Строк корисного використання, років | Термін використання обладнання, місяців | Амортизаційні відрахування, грн |
|---|-------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------|
| Електронний комплекс системи проектування | 41599,00 | 5 | 2 | 1386,63 |
| Персональний комп'ютер дослідника мереж | 22369,00 | 5 | 2 | 745,63 |
| Спеціалізоване робоче місце дослідника | 8910,00 | 7 | 2 | 212,14 |
| Пристрої виводу інформації | 6500,00 | 5 | 2 | 216,67 |
| Програмне забезпечення MICROSOFT WINDOWS 11 | 6890,00 | 3 | 2 | 382,78 |
| Комплекс електронно-оптичних пристроїв | 6999,00 | 4 | 2 | 291,63 |
| Оргтехніка | 8750,00 | 5 | 2 | 291,67 |
| Приміщення лабораторії досліджень | 369000,00 | 25 | 2 | 2460,00 |
| Всього | | | | 5987,15 |

4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (4.12)$$

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

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 7,50$ грн;

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

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

$$B_e = 0,32 \cdot 320,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 768,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.11 – Витрати на електроенергію

| Найменування обладнання | Встановлена потужність, кВт | Тривалість роботи, год | Сума, грн |
|---|-----------------------------|------------------------|-----------|
| Електронний комплекс системи проектування | 0,32 | 320,0 | 768,00 |
| Персональний комп'ютер дослідника мереж | 0,25 | 320,0 | 600,00 |
| Спеціалізоване робоче місце дослідника | 0,08 | 320,0 | 192,00 |
| Пристрої виводу інформації | 0,20 | 5,0 | 7,50 |
| Макет вузла доступу 5G | 0,10 | 100,0 | 75,00 |
| Серверне обладнання 5G мережі | 0,12 | 100,0 | 90,00 |
| Комплекс електронно-оптичних пристроїв | 0,11 | 100,0 | 82,50 |
| Оргтехніка | 0,50 | 2,2 | 8,25 |
| Всього | | | 1823,25 |

4.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Мобільні мережі 5G із використанням волоконно - оптичних технологій» 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.

4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

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

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (4.14)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo $H_{cn} = 30\%$.

$$B_{cn} = (74652,86 + 3265,84) \cdot 30 / 100\% = 23375,61 \text{ грн.}$$

4.2.11 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:

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (4.15)$$

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

$$I_s = (74652,86 + 3265,84) \cdot 55 / 100\% = 42855,28 \text{ грн.}$$

4.2.12 Накладні (загально виробничі) витрати

До статті «Накладні (загально виробничі) 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 (загально виробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.16)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загально виробничі) витрати», приймемо $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (74652,86 + 3265,84) \cdot 100 / 100\% = 77918,69 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Мобільні мережі 5G із використанням волоконно - оптичних технологій» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{дод} + Z_n + M + K_e + B_{спец} + B_{прг} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_e + B_{нзв}. \quad (4.17)$$

$B_{заг} = 74652,86 + 3265,84 + 8571,06 + 19027,75 + 5238,58 + 4458,87 + 27754,92 + 14590,80 + 5987,15 + 1823,25 + 0,00 + 23375,61 + 42855,28 + 77918,69 = 309520,65$
грн.

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

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.18)$$

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

$$ZB = 309520,65 / 0,95 = 325811,21 \text{ грн.}$$

4.3 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 «Мобільні мережі 5G із використанням волоконно - оптичних технологій» 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:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (4.19)$$

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. Прийmemo $n = 3$;

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

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

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 325811,21$ грн;

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

Визначення показників I , n , T_c , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [30].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 2 \cdot 4 / 325,8 \cdot 0,17 = 9,43.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Мобільні мережі 5G із використанням волоконно - оптичних технологій» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

4.4 Висновок до розділу 4

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Мобільні мережі 5G із використанням волоконно - оптичних технологій» складають 325811,21 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Мобільні мережі 5G із використанням волоконно-оптичних технологій» 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.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Згідно зі ст. 15 Закону «Про охорону праці» така служба обов'язково повинна бути створена на підприємстві з кількістю працюючих 50 і більше осіб у відповідності з Типовим положенням про службу охорони праці. Також має бути розроблено Положення про службу охорони праці цього підприємства, визначено структуру такої служби, її чисельність, основні завдання, функції та права її працівників.

На підприємствах з кількістю працівників менше 50 чоловік функції служби охорони праці можуть виконувати в порядку сумісництва (суміщення) особи, які мають відповідну підготовку. А на підприємствах з кількістю працівників менше 20 для виконання функцій служби охорони праці можуть на договірних засадах залучатися сторонні фахівці, які мають не менше трьох років виробничого стажу і пройшли навчання з охорони праці.

У приміщенні, де відбувалось дослідження мобільних мереж 5G із використанням волоконно-оптичних технологій присутні такі шкідливі та небезпечні фактори [2]:

- підвищена чи понижена температура повітря робочої зони;
- недостатнє освітлення робочої зони;
- недостатність природного освітлення;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- відсутність чи нестача природного світла;
- фізичні перевантаження (статичні);
- нервово - психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів, емоційні навантаження).

Відповідно до визначених факторів формуємо рекомендації щодо безпечних

умов праці під час дослідження мобільних мереж 5G із використанням волоконно-оптичних технологій.

5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Широке промислове та побутове використання ПК актуалізувало питання охорони праці його користувачів. Дотримання вимог цих правил може значно знизити наслідки несприятливої дії на працівників шкідливих та небезпечних факторів, які супроводжують роботу з ПК, зокрема можливість зорових, нервово-емоційних переживань, серцево-судинних захворювань.

Виходячи з цього, роботодавець повинен забезпечити гігієнічні й ергономічні вимоги щодо організації робочих приміщень для експлуатації ПК, робочого середовища, робочих місць з ПК, режиму праці і відпочинку при роботі з ПК тощо, які викладені у Правилах.

Основні вимоги до виробничого приміщення для експлуатації ПК:

- приміщення не може бути розміщено у підвалах та цокольних поверхах;
- площа на одне робоче місце в такому приміщенні повинна становити не менше 6,0м², а об'єм не менше 20,0 м³;
- приміщення повинно мати природне та штучне освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [6];
- необхідно щоденно проводити вологе прибирання;
- поруч з приміщенням для роботи з ПК мають бути обладнані: побутова кімната для відпочинку під час роботи; кімната психологічного розвантаження.

Організація робочого місця користувача комп'ютера повинна забезпечувати відповідність усіх елементів робочого місця та їх взаємного розташування ергономічним вимогам. Виконуючи практичні завдання щодо використання робочої пози, потрібно:

- зменшувати величину статичних напружень;
- розподіляти статичні напруження;
- передбачати можливість змін пози під час роботи.

Для роботи операторів ПК у положенні сидячи рекомендовані такі параметри робочого простору: ширина - не менше 700 мм, глибина - не менше 400 мм, висота робочої поверхні над підлогою – 700 ...750 мм. Під робочою поверхнею необхідно

передбачити простір для ніг: висота - менше 600 мм, ширина - не менше 500 мм, глибина - не менше 400 мм. За необхідності огляду робочого місця його висота не повинна перевищувати 1200 мм

Під час роботи сидячи нижня частина корпусу розслаблена, а основне статичне навантаження припадає на м'язи шії, спини, таза, стегон. Неправильна сидяча поза може викликати застій крові в ногах, а якщо виконується великий обсяг роботи для пальців рук – запалення суглобів.

При проектуванні письмового столу варто враховувати наступне:

- висота столу повинна бути обрана з урахуванням можливості сидіти вільно, у зручній позі, при необхідності спираючи на підлокітники;
- нижня частина столу повинна бути сконструйована так, щоб оператор міг зручно сидіти, не був змушений підбирати ноги;
- поверхня столу повинна мати властивості, що виключають появу відблисків у поле зору оператора;
- конструкція столу повинна передбачати наявність висувних шухляд (не менш 3-х для збереження документації, канцелярського приладдя, особистих речей).

На робочому місці дослідника мобільних мереж 5G із використанням волоконно-оптичних технологій існує небезпека поразки електричним струмом. Електричний струм, впливаючи на тіло людини, може заподіяти йому явні чи приховані пошкодження, в тому числі опіки всього тіла або окремих його ділянок; електричні удари характерні внутрішніми ушкодженнями тощо.

Приміщення, де виконується робота, згідно ПУЕ «Правила влаштування електроустановок» класифікується як приміщення без підвищеної небезпеки [12].

Безпечна експлуатація електроустановок здійснюється у відповідності з вимогами ПУЕ [12] та «Правила безпечної експлуатації електроустановок» [8] і передбачає такі заходи та засоби:

- недоступність струмоведучих частин, прокладання електрокабелів під підлогою, в спеціальних каналах, скрите виконання освітлювальної проводки, ізоляцію струмо-провідних елементів ($R_{із} \geq 0.5 \text{ МОм}$);

- захисне заземлення всіх металевих струмопровідних частин електроустановок та ПК ($R_{з доп} \leq 4 \text{ Ом}$);
- використання пониженої напруги 36 В (для аварійного освітлення щита) в операторському пункті та виробничому приміщенні;
- застосування попереджувальної сигналізації, написів, плакатів при проведенні планово-попереджувальних ремонтів і профілактичних випробувань електрообладнання;
- проведення організаційних заходів (спеціальне навчання, атестація та переатестація осіб електротехнічного персоналу, інструктажі тощо).

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Температура, відносна вологість, швидкість руху повітря біля тіла людини, а також температура стін і навколишніх предметів утворюють мікроклімат на робочому місці. Температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря вимірюють на висоті 1,0 м від підлоги або робочої площадки при роботах, що виконуються сидячи, і на висоті 1,5 м – при роботах, що виконуються стоячи, і не ближче 1 м від нагрівальних приладів і зовнішніх стін.

Робота, яка виконується дослідником мобільних мереж 5G із використанням волоконно-оптичних технологій згідно за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [1]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.2.1.

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату

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

Для забезпечення комфортних умов використовуються як організаційні методи (раціональна організація проведення робіт залежно від пори року і доби,

чергування праці і відпочинку), так і технічні засоби (вентиляція, кондиціонування повітря, опалювальна система).

5.2.2. Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м^3 згідно ДСН 3.3.6.042-99 [10]. Джерелами запиленості повітря в приміщенні є одяг людей і пил, що проникає з вулиці. У приміщенні немає значного виділення шкідливих газів. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 5.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

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

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл.2.3).

Таблиця 5.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

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

Забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється за допомогою системи припливно-витяжної вентиляції, регулярного провітрювання, та вологого прибирання.

5.2.3 Виробниче освітлення

Правильно спроектоване освітлення, яке відповідає вимогам санітарних норм здійснює позитивний психологічний вплив на працівника, знижує втому, створює оптимальні умови для роботи органів зору, і тим самим підвищує безпеку праці і знижує травматизм.

Освітлення створюється природним сонячним світлом (природне) і світлом від електричних ламп (штучне). Природне освітлення є найсприятливішим для людини, так як сонячне світло має оптимальний спектр, в ньому наявна достатня кількість ультрафіолетових променів. Штучне освітлення передбачається у приміщеннях, де недостатньо природного світла, і для освітлення у вечірні та нічні години.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні, які необхідно забезпечити під час виконання роботи зазначені у таблиці 2.4 (за ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення [6]):

Таблиця 5.4 - Норми освітленості в приміщенні

| Характеристика зорової роботи | Найменший розмір об'єкта розрізнення | Розряд зорової роботи | Підривок зорової роботи | Контраст об'єкта розрізнення з фоном | Характеристика фона | Освітленість, лк | | КПО, e_n , % | | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------|----------|---------------------|--------|----------------------------|--------|
| | | | | | | Штучне освітлення | | Природне освітлення | | Сумісне освітлення | |
| | | | | | | Комбіноване | Загальне | Верхнє або верхнє | Бокове | Верхнє або верхнє і бокове | Бокове |
| Високої точності | 0,3 – 0,5 | III | г | великий | світлий | 700 | 300 | 5 | 2 | 3 | 1,2 |

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимальне використання бічного природного освітлення.
- 2) Систематичне очищення скла від бруду.
- 3) Використання жалюзі на вікнах для регулювання кількості природного

світла у приміщенні.

4) Загальне штучне освітлення створюється за допомогою люмінесцентних ламп.

5.2.4 Виробничий шум

Шум визначають як сукупність аперіодических звуків різної інтенсивності та частоти. Шум заважає роботі, знижує працездатність і продуктивність праці, при тривалій і інтенсивній дії викликає захворювання організму.

У закритих приміщеннях шум, багаторазово відбиваючись від стін та стелі, посилюється. Тому рекомендується проводити їх акустичну обробку за допомогою звукопоглинальних облицювань з пористих матеріалів, які мають великий коефіцієнт звукопоглинання.

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99 [9].

Таблиця 5.5 - Рівень звукового тиску

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

Для зменшення шуму здійснюють своєчасний ремонт та профілактику обладнання.

5.2.5. Виробничі випромінювання

На робочому місці дослідника мобільних мереж 5G із використанням волоконно-оптичних технологій у зв'язку із експлуатацією електричної апаратури, існує ризик виникнення підвищеного рівня електромагнітного випромінювання.

Ступінь біологічного впливу електромагнітних полів на організм людини залежить від частоти коливань, напруженості та інтенсивності поля, тривалості його впливу.

Підвищений рівень електромагнітних випромінювань шкодить здоров'ю людини. Від цього страждає передусім нервова і серцево-судинна системи, виникають головний біль і перевтома, знижується точність робочих рухів, порушується сон. Електромагнітне випромінювання викликає зміни тиску крові, гіпотонію або гіпертонію.

Рівні електромагнітних випромінювань моніторів, які вважаються безпечними для здоров'я користувачів, регламентуються нормами MPR II 1990:10 Шведського національного комітету з вимірювань та досліджень (табл.2.6) [11, с.348].

Таблиця 5.6 - Допустимі рівні випромінювань моніторів ПК

| Вид поля | ТСО | MPR II |
|---|--|---|
| Змінне електричне поле 5 Гц – 2 кГц 2 кГц – 400 кГц | 10 В/м 1 В/м на відстані 0,3 м від центра екрана і 0,5 м навколо монітора | 2,5 В/м 2,5 В/м на відстані 0,5 м навколо монітора |
| Змінне магнітне поле 5 Гц – 2 кГц 2 кГц – 400 кГц | 250 нТл 200 мА/м 25 нТл 20 мА/м на відстані 0,3 м від центра екрана і 0,5 м навколо монітора | 250 нТл 200 мА/м 25 нТл 20 мА/м на відстані 0,5 м навколо монітора |

Для захисту людини від дії електромагнітних випромінювань використовують обмеження часу перебування персоналу в робочій зоні та встановлюють раціональні режими експлуатації ПК і роботи працюючого персоналу.

5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Оцінка обстановки в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

5.3.1 Дія радіації на живі організми

Кінцевим результатом початкової дії іонізуючих випромінювань є порушення структури тканини і клітин. Після припинення процесу опромінення живого організму біохімічні зміни не припиняються тому, що утворені іони і радикали продовжують свою активну дію ще деякий період часу. Виникає період вторинної дії променів.

Особливості біологічної дії іонізуючих випромінювань такі:

- біологічний ефект залежить від поглинутої дози випромінювання. Ця залежність прямо пропорційна – із зростанням дози посилюється ефект;
- ефект опромінення пов'язаний із розподілом дози за часом, тобто із місткістю поглинання енергії. Ступінь променевого ураження залежить від розділу сумарної дози на окремі фракції. Якщо число фракцій зростає;
- ураження живого організму зменшується тому, що в ньому між окремими порціями ураження розпочинається відновлення деяких функцій [1].

5.3.2 Оцінка обстановки при радіоактивному зараженні території підприємства внаслідок аварії на АЕС

Провести оцінку обстановки при радіоактивному зараженні території підприємства внаслідок аварії на АЕС, якщо виміряний рівень радіації через $t = 9$ год складає $P_t = 0,2$ р/год, а роботи почалися через $t_n = 10$ год після зараження. Допустима доза опромінення $D_{дон} = 2$ р.

Знаходимо рівень радіації через 1 год після аварії:

$$P_1 = P_t t^{0,5} \text{ [р/год]}; \quad (5.2)$$

$$P_1 = 0,2 \cdot 9^{0,5} = 0,6 \text{ (р/год)}.$$

Визначимо час початку дезактивації місцевості за допомогою такої формули

$$D_M = \frac{2P_1(\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{K_{ocл}} [p], \quad (5.3)$$

де t_n, t_k – час початку та кінця опромінення, год;

$K_{ocл}$ – коефіцієнт ослаблення радіації ($K_{ocл} = 1$ для відкритої місцевості).

Час кінця опромінення визначимо за формулою:

$$t_k = t_\delta + t_n [\text{ГОД}]. \quad (5.4)$$

Прирівнявши можливу дозу опромінення до допустимої отримаємо:

$$\sqrt{t_\delta + t_n} - \sqrt{t_n} = \frac{D_{дон} K_{ocл}}{2P_1} = a. \quad (5.5)$$

Піднесемо до квадрату обидві частини рівняння

$$t_\delta + t_n - 2\sqrt{t_n} \sqrt{t_\delta + t_n} + t_n = a^2, \quad (5.6)$$

або

$$2\sqrt{t_n} \sqrt{t_\delta + t_n} = t_\delta + 2t_n - a^2. \quad (5.7)$$

Знову піднесемо до квадрату обидві частини рівняння

$$4t_n t_\delta + 4t_n^2 = (t_\delta - a^2)^2 + 4t_n(t_\delta - a^2) + 4t_n^2, \quad (5.8)$$

звідки

$$t_\delta^2 - 2t_\delta a^2 + a^4 - 4t_n a^2 = 0. \quad (5.9)$$

Отримано квадратне рівняння відносно t_p . Розв'яжемо його за допомогою дискримінанту 1:

$$D_1 = a^4 - (a^4 - 4t_n a^2) = 4t_n a^2 > 0; \quad (5.10)$$

$$t_\partial = a^2 \pm \sqrt{4t_n a^2} = a^2 \pm 2a\sqrt{t_n}. \quad (5.11)$$

Вибираємо додатній корінь рівняння:

$$t_\partial = a^2 + 2a\sqrt{t_n} \text{ [год]}. \quad (5.12)$$

Знайдемо спочатку величину a

$$a = \frac{D_{\text{доп}} K_{\text{осл}}}{2P_1} \quad (5.13)$$

$$a = \frac{2 \cdot 1}{2 \cdot 0,6} = 1,67.$$

Отже, за формулою (5.12) знайдемо допустимий час перебування населення в зонах небезпечного і надзвичайно небезпечного забруднення без засобів індивідуального захисту на відкритій місцевості

$$t_\partial = 1,67^2 + 2 \cdot 1,67\sqrt{10} = 13,35 \text{ (год)}.$$

Висновки

Досліджено обстановки в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій. Визначено допустимий час перебування населення в зонах небезпечного і надзвичайно небезпечного забруднення без засобів індивідуального захисту на відкритій місцевості – 13,35 год.

ВИСНОВКИ

У першому розділі магістерської дисертації представлений аналіз сучасного стану мережі 5G. Основні відмінності комунікаційних мереж п'ятого покоління від існуючих вимагають більш високої швидкості передачі даних, дають можливість підключати більше пристроїв, а також масштабної віртуалізації. Для задоволення цих вимог потрібне використання нових технологій, такі технології, як віртуалізація мережевих функцій VNF, взаємодія пристрій-пристрій D2D.

Другий розділ присвячений визначенню основних характеристик мереж 5G та їх порівнянню з існуючими мережами ІМТ. Наводиться загальний опис послуг сервісів, призначених для надання в мережах 5G, а також описується топологічне рішення для радіоінтерфейсів і для мережевої інфраструктури 5G.

Розглянуто взаємозв'язок між 5G, IoT та LPWAN.

В розділі 3 розробляється модель черги масового обслуговування PS для оцінки продуктивності стільникових мереж передачі даних за допомогою політики циклічного перебору, яка враховує внутрішньо- і міжстільникову мобільність користувачів. Було показано, що модель узгоджується з відомими аналітичними межами, що відповідають статичним користувачам або нескінченній швидкості, і забезпечує дуже хорошу точність для більш загальних швидкостей. Модель підтверджує, що мобільність може покращити продуктивність користувачів в даному стільнику і дозволяє кількісно оцінити вигравш. Він також забезпечує наскрізну продуктивність користувачів в мережі статистично еквівалентних комірок і показує, що продуктивність більше не є монотонною функцією швидкості.

Четвертий розділ присвячений економічній оцінці проведених досліджень. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Мобільні мережі 5G із використанням волоконно-оптичних технологій» 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.

У п'ятому розділі розглянуті питання охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях. Зокрема були розглянуті параметри мікроклімату, освітленості, рівня шуму в приміщенні де здійснювались дослідження. Також була здійснена оцінка обстановки в умовах надзвичайних ситуацій.

Підхід, використаний у цій роботі, який полягає у відокремленні моделі мобільності від моделі стільникового зв'язку, може бути застосований до багатьох інших модельних систем, таких як пов'язані моделі черги PS для мереж взаємодіючих базових станцій, або до моделі для більш загальних політик планування.

6 СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Paramanand Sharma and Sapana Shukla, "Comparative study of 1G, 2G,3G,AND 4G", Department of electronics and communication, RKGITW, ISSN No: 2319-5606
- 2 Gurinder Kaur and Komal Sharma, "Review paper on 5G technology" assistant professor of department of electronics and communication, rayatbahra university, ISSN NO: 2321-0613
- 3 Intelligence, G. (2014). Understanding 5G:Perspectives on future technological advancements inmobile. GSMA Intelligence.
- 4 D. Minoli, K. Sohraby, and B. Occhiogrosso, "IoT considerations, requirements, and architectures for smart buildings – energy optimization and next generation building management systems," IEEE Internet of Things Journal, vol. 4, no. 1, pp. 269–283, 2017.
- 5 Erik G. Larsson and Liesbet Van der Perre, "massive MIMO for 5G" IEEE 5G Tech Focus: Vol 1, Num 1, (March 2017)
- 6 Amy Nordum, Kristen Clark "5G bytes: beamforming Explained" IEEE spectrum staff, (Jul 2017)
- 7 Sandeep Singh and Mridul Chawla,"A eview on millimeter wave communication and effect on 5G system" Assistant professor of department of electronics & communication, chotu ram university science and technology, ISSN No: 2393-8021
- 8 Nurul H. Mahmood and Marta G. Sarret " Full duplex communication in 5G small cells" WCN section, Department of electronic system , Aalborg University (Jul 2017), ISSN: 2376-656, DOI: 10.1109/WCMC.2017.7986534
- 9 X. Ge, L. Pan, Q. Li et al., "Multipath cooperative communications networks for augmented and virtual reality transmission," IEEE Transactions on Multimedia, vol. 19, no. 10, pp. 2345–2358, 2017.
- 10 A. Asadi, W. Qing and V. Mancuso, "A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014.

- 11 A. Laya, L. Alonso, J. Alonso-Zarate and M. Dohler, "Green MTC, M2M, Internet of Things," Green Communications: Principles, Concepts and Practice, 2015
- 12 Y. Li, T. Wu, P. Hui, D. Jin and S. Chen, "Social-aware D2D communications: qualitative insights and quantitative analysis," IEEE Communications Magazine, 2014.
- 13 "Security architecture and procedures for 5G System," 3GPP TS 33.501, 2018
- 14 "Wireless Technology Evolution Towards 5G: 3GPP Release 13 to Release 15 and Beyond." 5G Americas, Feb. 2017.
- 15 "LTE to 5G: The Global Impact of Wireless Innovation." 5G Americas/Rysavy Research White Paper, Rysavy Research/5G Americas, Aug. 2018.
- 16 Бакулін М.Г., Крейнделін В.Б., Панкратов Д.Ю. Технології в системах радіозв'язку на шляху до 5G. 2018р.- 280с.
- 27 C. Tarhini and T. Chahed, "Qos-oriented resource allocation for streaming flows in ieee802. 16e mobile wimax," Telecommunication Systems, vol. 51, no. 1, pp. 65–71, 2012.
- 28 B. Baynat, R.-M. Indre, N. Nya, P. Olivier, and A. Simonian, "Impact of mobility in dense lte-a networks with small cells," in IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), pp. 1–5, IEEE, 2015.
- 29 Bruno Baynat, Narcisse Nya Kamtchoum. Performance Model for 4G/5G Networks Taking into Account Intra- and Inter-Cell Mobility of Users. 41st IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN 2016), IEEE, Nov 2016, Dubai, United Arab Emirates. pp.212-215, 10.1109/LCN.2016.45. hal- 01620458
- 30 Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
- 31 ДСТУ ОHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог ОHSAS 18001:2007 (ОHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с
- 32 ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004.

33 НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-05>

34 ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>

35 ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>

36 ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>

37 НАПБА.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с

38 ДБНВ.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд. К. : Мінбуд України, 2006. 154 с

39 ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

40 ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

41 Охорона праці та промислова безпека: навч. посіб. [К.Н.Ткачук, В.В.Зацарний, Р.Н.Сабарно та ін.]; за ред. К.Н.Ткачука, В.В.Зацарного. – К.: Основа. – 2009. – 454 с.

42 Правила улаштування електроустановок. URL: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html> НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php

43 Сакевич В. Ф. Основи розробки питань цивільної оборони в дипломних проектах / В. Ф. Сакевич. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 109 с.

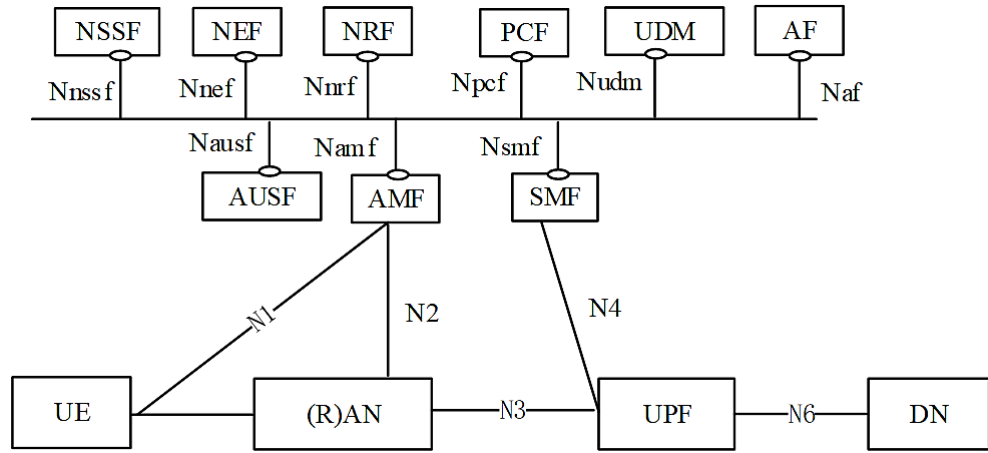
ДОДАТОК А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
МОБІЛЬНІ МЕРЕЖІ 5G ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
назва магістерської кваліфікаційної роботи

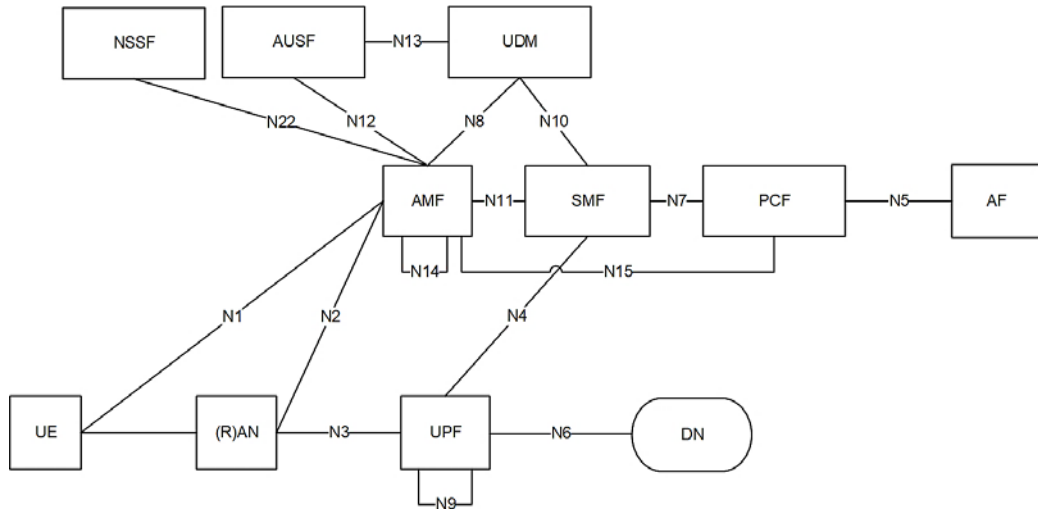
Структура мережі 5G



Архітектура мережі 5G. Мережеві функції та мережеві інтерфейси

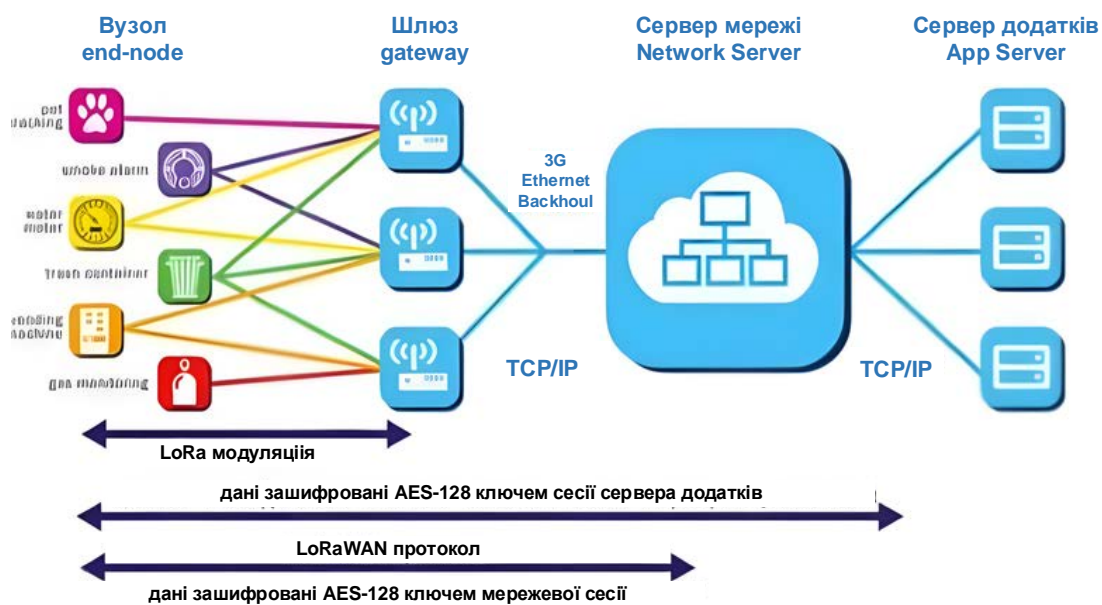


Архітектура мережі 5G: Взаємодія мережевих функцій

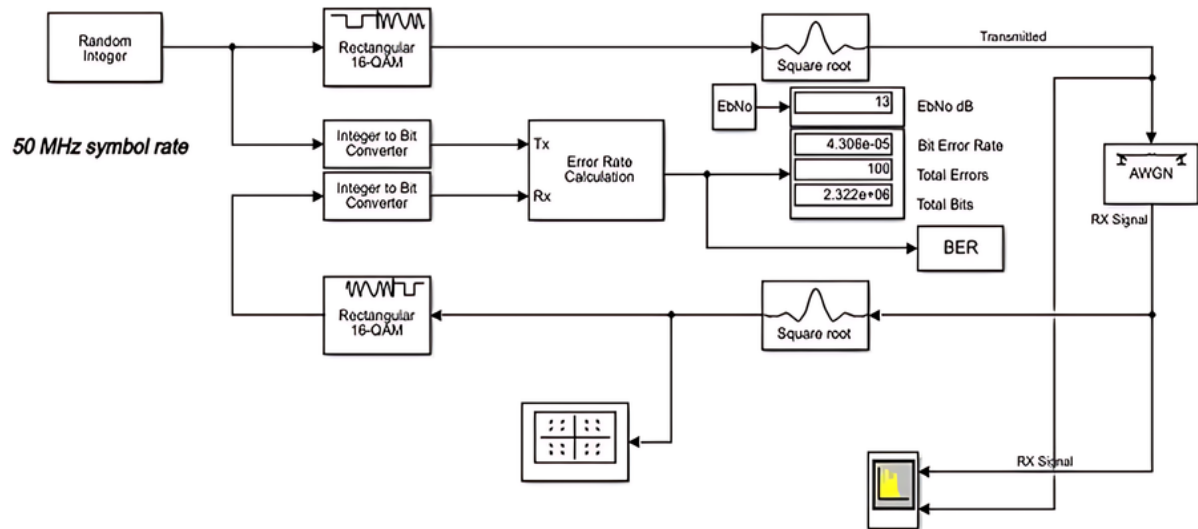


Архітектура мережі 5G. Мережеві інтерфейси

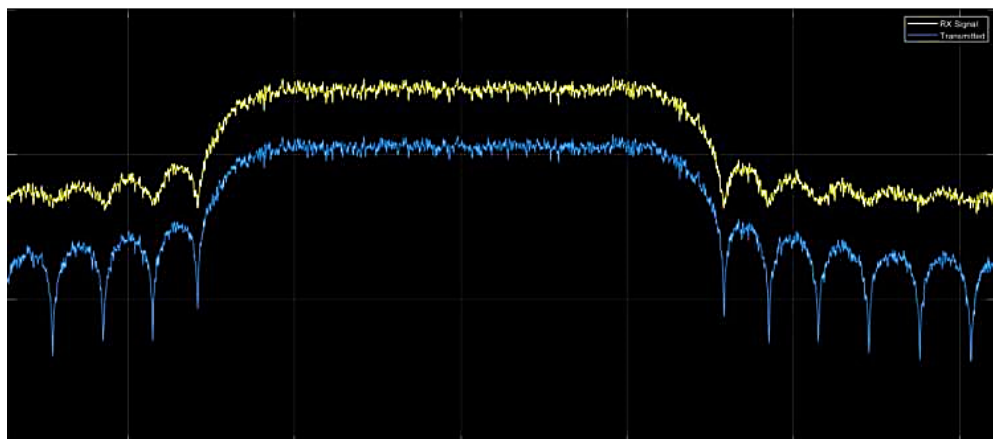
Мережева архітектура LoRa



Моделювання LoRa в пакеті програм MatLab

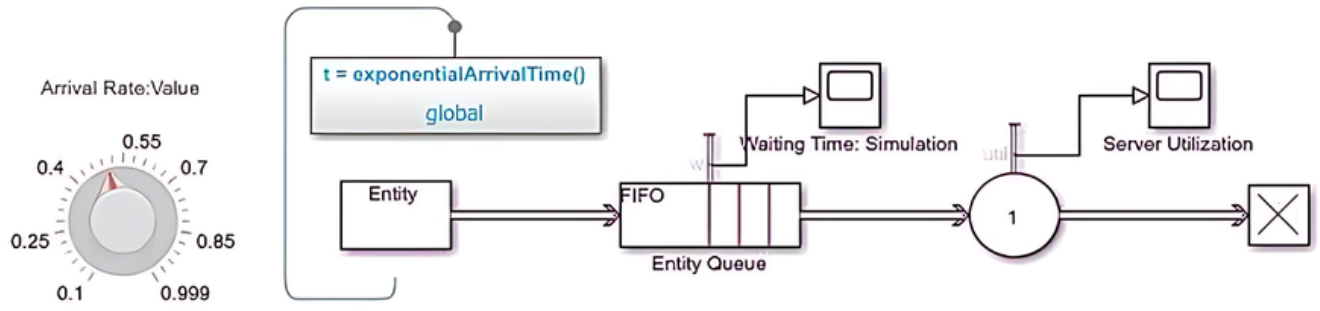


Структурна схема передавача та приймача LoRa.

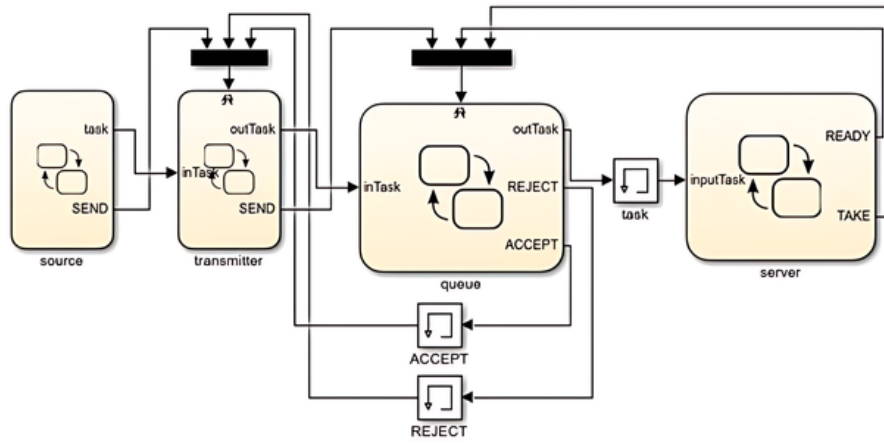


Переданий та прийнятий сигнал

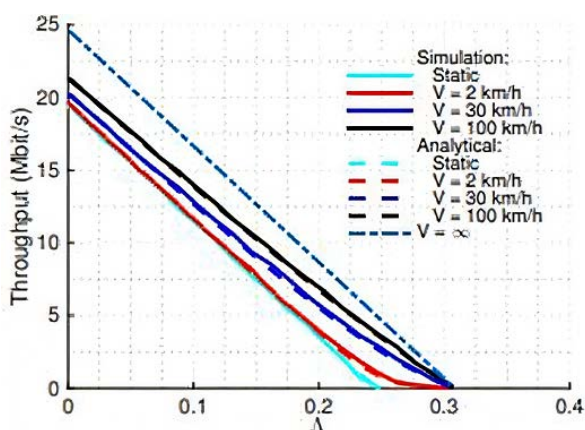
Модель очереди PS



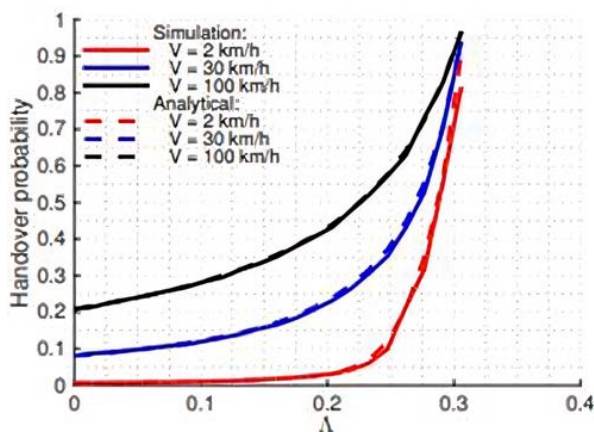
Ілюстрація передачі даних між зонами та поза ними



Результати досліджень



Пропускна здатність, одержувана активними користувачами в залежності від загальної швидкості надходження нових вимог до підключення



Імовірність передачі обслуговування в залежності від загальної швидкості надходження нових запитів на підключення.

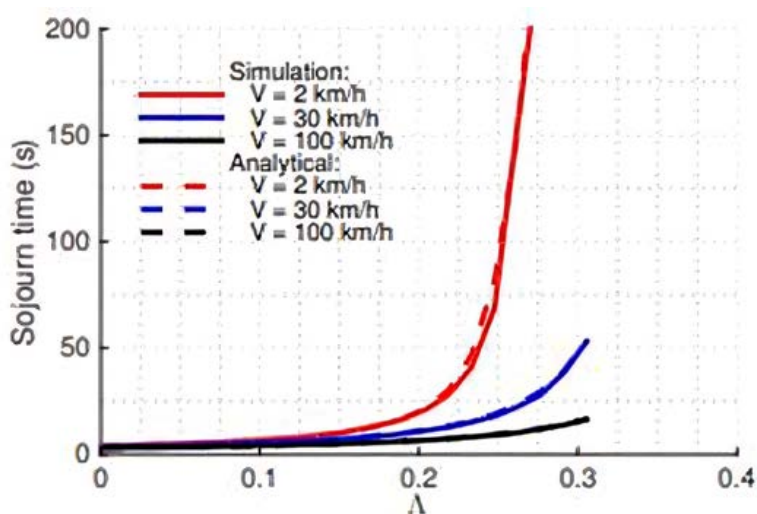
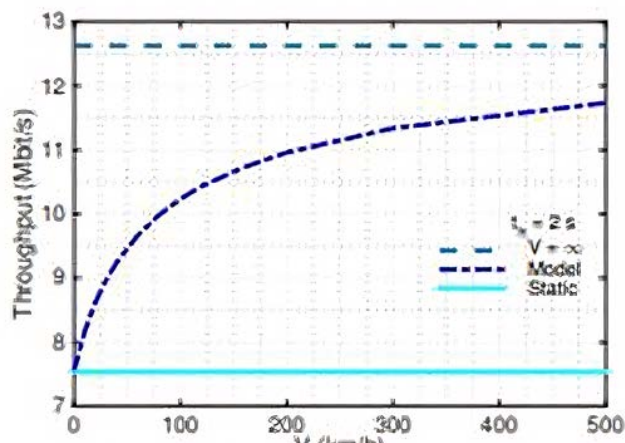
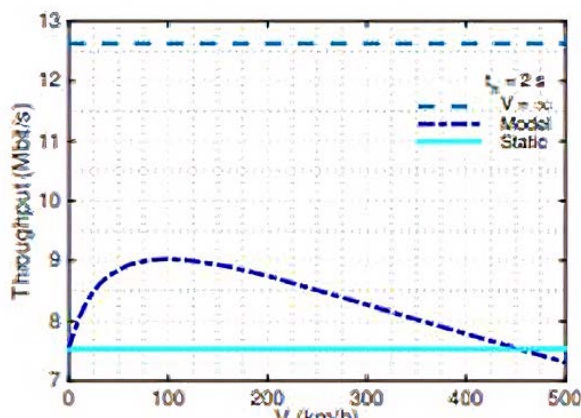


Рисунок 3.7 – Середній час перебування в розглянутій комірці як функція загальної швидкості надходження нових з'єднань.



Середня пропускна здатність, отримана активними користувачами в залежності від швидкості користувачів при $\Lambda = 0,15$.



Середня пропускна здатність, одержувана активними користувачами в залежності від швидкості користувачів з урахуванням переривання обслуговування через процедуру передачі даних при $\Lambda = 0,15$.

ДОДАТОК Б
ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Мобільні мережі 5G із використанням волоконно оптичних технологій»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
 (БДР, МКР)

Підрозділ кафедра інфокомунікаційних систем і технологій, факультет
інформаційних електронних систем
 (кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 84,1% Схожість 15.9%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. 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.

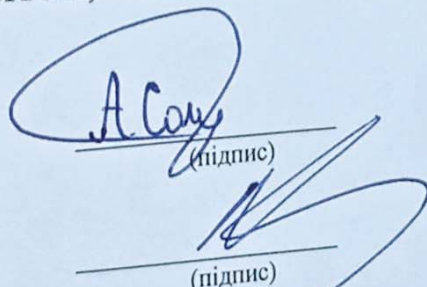
Особа відповідальна за перевірку


 (підпис)

Васильківський М.В.
 (прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи


 (підпис)

Сорока А.І.
 (прізвище, ініціали)

Керівник роботи

Кичак В.М.
 (прізвище, ініціали)