

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій Ethernet та Wi-Fi»

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


Рибачук Я.С.

Керівник: к.т.н., професор каф. ІКСТ
Михалевський Д.В.

« 14 » 12 2023 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС
Осадчук В.С.

« 12 » 12 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 12 » 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)

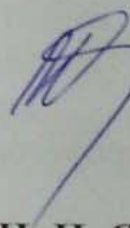
Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

“08” 09 2023 року



ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Рибачуку Ярославу Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій Ethernet та Wi-Fi

керівник роботи Михалевський Дмитро Валерійович, докт. техн. наук, професор

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

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


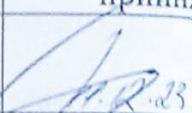
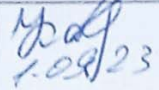



2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Технології мереж доступу – Wi-Fi, Ethernet; Ширина смуги частот каналу – 40 МГц; Центральна частота діапазону Wi-Fi – 5 ГГц; Радіус зони – 40м; Тип модуляції – 4K-QAMs.

4. Зміст текстової частини: Вступ; Мережі доступу на основі мереж Wi-Fi; Технологія Ethernet; Потокове передавання мультимедіа з періодичним резервуванням; Економічна частина; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; Список використаних джерел.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Еволюція технології Wi-Fi; Методи передачі даних; організація передачі даних за допомогою OFDMA; Архітектура мережі на основі Ethernet; Типи потоків мережі; Числові результати.

6. Консультанти розділів роботи

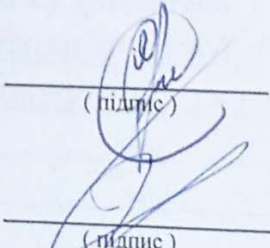
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Михалевський Д.В., професор кафедри ІКСТ	 1.09.23	 1.09.23
Економічна частина	Кавецький В.В. доцент, к.е.н., доцент кафедри ЕПВМ	 1.09.23	 1.09.23
Охорона праці	Дембіцька С.В. доцент, д.п.н., професор кафедри БЖДПБ	 1.09.23	 1.09.23

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	При
1.	Розробка технічного завдання	08.09.2023р.	
2.	Техніко-економічне обґрунтування розробки	17.09.2023р.	
3.	Аналіз методів і засобів побудови мереж IEEE 802.11ax	06.10.2023р.	
4.	Розробка структури мереж на основі технології Ethernet	27.10.2023р.	
5.	Потокове передавання мультимедіа з періодичним резервуванням	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, опонування МКР	08.12.2023р.	
11.	Захист МКР ЕК	11.12.2023р.	

Студент


(підпис)

Рибачук Я.С.

Керівник роботи

Михалевський Д.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Рибачук Я.С. Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій Ethernet та Wi-Fi. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка, освітня програма - телекомунікаційні системи та мережі. Вінниця: ВНТУ, 2023. 156 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 35 назв; рис.: 26; табл. 15.

У роботі розроблено комплекс математичних моделей нових методів множинного доступу для дослідження їх ефективності з точки зору надійності та часу доставки пакетів і споживання каналів. Крім того, були розроблені алгоритми підвищення ефективності цих методів доступу.

Показано, як за допомогою розроблених моделей визначаються параметри резервування та схеми передачі даних, що дозволяють задовольнити вимоги до якості обслуговування мультимедійних потоків при мінімальних витратах каналних ресурсів.

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: бездротовий зв'язок, пропускна здатність, мультимедійний трафік, мережа зв'язку.

ABSTRACT

UDC 621.396

Rybachuk Y.S. Study of the optimal network structure based on Ethernet and Wi-Fi technologies. Master's thesis in the specialty 172 – Telecommunications and Radio Engineering, educational program - Telecommunication Systems and Networks. Vinnytsia: VNTU, 2023. 156 p.

In Ukrainian. language. Refs.: 35 titles; figs.: 26; tables. 15.

A set of mathematical models of new multiple access methods has been developed to study their effectiveness in terms of reliability and time of packet delivery and channel consumption. In addition, algorithms have been developed to improve the efficiency of these access methods.

It is shown how, with the help of the developed models, the parameters of redundancy and data transmission schemes are determined, which allow to meet the requirements for the quality of service of multimedia streams with minimal consumption of channel resources.

The graphic part consists of 6 posters with the results of the simulation.

In the section of labor protection, such issues as the causes, effect on the human body and rationing of harmful and dangerous production factors in the production facility are worked out; map of working conditions (justification of the choice of normalized 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, as well as fire safety standards.

Keywords: wireless communication, bandwidth, multimedia traffic, communication network.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. МЕРЕЖІ ДОСТУПУ НА ОСНОВІ МЕРЕЖ WI-FI	9
1.1 Еволюція технології Wi-Fi	9
1.2 Архітектура мережі Wi-Fi	22
1.3 Удосконалений широкосмуговий зв'язок	29
2. ТЕХНОЛОГІЯ ETHERNET	46
2.1 Специфікації IEEE для локальних мереж	46
2.2 Локальні мережі Ethernet	49
2.3 Фізичне середовище Fast Ethernet	55
3. ПОТОКОВЕ ПЕРЕДАВАННЯ МУЛЬТИМЕДІА З ПЕРІОДИЧНИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ	63
3.1 Математична постановка задачі	63
3.2 Математичні моделі передачі даних з використанням періодичного резервування	66
3.3 Числові результати	78
3.4 Особливості практичного використання резервувань	89
3.5 Розробка методу моделювання для інших сценаріїв	94
3.6 Висновки до третього розділу	103
4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	105
4.1 Оцінювання наукового ефекту	105
4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи	108
4.2.1 Витрати на оплату праці	108
4.2.2 Відрахування на соціальні заходи	111
4.2.3 Сировина та матеріали	112
4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі	113
4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт	114
4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт	115
4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень	116

4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей	116
4.2.9 Службові відрядження	118
4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	119
4.2.11 Інші витрати.....	119
4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати	120
4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково- дослідної роботи.....	121
4.4 Висновок до розділу 4	122
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ....	124
5.1 Технічні рішення з безпечного виконання робіт.....	125
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	129
5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.....	136
Висновки	140
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	142
Додатки	146
Додаток А	146
Еволюція технології WI-FI.....	147
Методи передачі даних.....	148
Організація передачі даних за допомогою OFDMA	149
Архітектура мережі на основі ETHERNET.....	150
Типи потоків мережі.....	151
Числові результати	152
Додаток Б	156
Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	156

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Оскільки в сучасному світі неможливо недооцінити вплив технологій Wi-Fi на повсякденне життя людей. Wi-Fi став невід'ємною складовою нашого оточення, використовуючи сімейство стандартів IEEE 802.11, яке постійно поповнюється новими додатками до основного стандарту. Запровадження нових інтернет-сервісів, високі вимоги користувачів до якості обслуговування трафіку, зростання кількості підключених пристроїв, включаючи розвиток Інтернету речей та промислового Інтернету, а також необхідність передачі даних з мінімальним енергоспоживанням та гарантованою затримкою, створюють нові та непередбачувані виклики для розробників технологій Wi-Fi.

У мережах Wi-Fi, де вимоги до якості обслуговування є неоднорідними та часто суперечливими, додатково ускладнюється використання неліцензійних радіочастот та можливість випадкового доступу до каналу, що базується на технології прослуховування оператора. Саме тому останні розширення стандарту Wi-Fi включають нові методи множинного доступу, які враховують вимоги до якості обслуговування для ширококутового трафіку, такого як мультимедійні потоки та веб-трафік, а також для трафіку додатків у реальному часі. Ці методи доступу представлені у додатках IEEE 802.11aa, IEEE 802.11ah, IEEE 802.11ax і продовжуються розробкою у рамках додатка IEEE 802.11be[1-4].

Стандарт IEEE 802.11 і доповнення до нього є рамковими: вони хоч і описують кілька методів доступу, але не уточнюють, як їх використовувати і з якими параметрами. Тому дослідження ефективності нових методів побудови, а також розробка алгоритмів їх використання є актуальними.

Існує багато робіт в області сучасних бездротових локальних мереж з неоднорідним трафіком.

Вирішальний внесок у теоретичне вивчення методів множинного доступу внесли такі вчені В.Л. Стефанюк, А.М., Г. Б'янки, Р.Г. Галлагер, Л. Клейнрокта

інші.

У роботах цих вчених досліджуються різні підходи до моделювання передачі даних в різних системах, але їм не вистачає методів тематичного моделювання чутливої до затримки передачі поточкових даних в умовах завад з використанням передових методів періодичного резервування каналів, які описані в багатьох недавніх доповненнях до стандарту IEEE 802.11. Крім того, відомі алгоритми планування радіоресурсів не враховують особливості множинного доступу з ортогональним частотним розподілом (OFDMA) в мережах IEEE 802.11ax і IEEE 802.11, і тому не можуть бути використані в них[5].

Дослідженню методів надійної доставки даних з низькою затримкою в бездротових мережах присвячені роботи С. Піна і Б. Беллалта, А. Джонс, Ж.-М. Парк, К. Педерсен. Однак проблема підтримки додатків реального часу, що вимагають швидкості передачі даних із затримкою менше десяти мілісекунд, раніше не розглядалася в мережах Wi-Fi.

Аналіз останніх досліджень

Одним із ключових напрямків досліджень є розвиток мереж Ethernet з використанням нових стандартів передачі даних, таких як 5GBASE-T та 10GBASE-T, що дозволяють збільшити швидкість передачі даних до 5 або 10 гігабіт на секунду відповідно. Це сприяє підвищенню загальної продуктивності мережі, також одним з важливих аспектів досліджень є розробка алгоритмів управління мережевими ресурсами, що дає змогу ефективно розподіляти пропускну здатність, мінімізувати затримки та забезпечувати якісне обслуговування для різноманітних типів трафіку. Крім того, проводиться активна робота над вдосконаленням технології Wi-Fi для забезпечення більшої швидкості та стабільності бездротового зв'язку. Стандарт Wi-Fi 7 дозволяє забезпечити більшу пропускну здатність та знизити завантаження мережі.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження методів множинного доступу сучасних мереж Wi-Fi з Ethernet та підвищення їх ефективності їх побудови.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання:

1. Провести аналіз технології безпроводового доступу на основі останніх розробок технології Wi-Fi.
2. Провести аналіз технології проводового доступу на основі технології Ethernet.
3. Удосконалення методу математичного моделювання обслуговування мультимедійних потоків за допомогою періодичного резервування каналів з метою вибору параметрів резервування та схем передачі даних, що дозволяють мінімізувати кількість споживаних ресурсів каналу при дотриманні вимог до якості обслуговування

Методи дослідження. Для розв'язання задач, поставлених у роботі, були використані методи дискретної математики та теорії графів, теорії ймовірностей, теорії марковських стохастичних процесів, теорії масового обслуговування. Імітаційне моделювання проводилося з використанням систем дискретно-подієвого моделювання.

Об'єктом дослідження є бездротові локальні обчислювальні мережі (Wi-Fi), а предметом даного дослідження є моделі та методи множинного доступу в бездротових локальних обчислювальних мережах.

Методи досліджень базуються на використанні: методів дискретної математики та теорії графів, теорії ймовірностей, теорії стохастичних процесів Маркова, теорії масового обслуговування. Імітаційне моделювання проводилося з використанням систем математично моделювання.

Новизна одержаних результатів:

а) удосконалено методику моделювання потокової передачі даних у мережах Wi-Fi в умовах завад з використанням різних методів доступу, заснованих на періодичному резервуванні каналів, з метою вибору параметрів резервування, що забезпечують виконання вимог якості обслуговування при мінімальних витратах ресурсів каналу.

б) розроблено алгоритми планування радіоресурсів, які враховують

особливості ортогонального частотного поділу множинного доступу в мережах IEEE 802.11ах та забезпечують збільшення пропускної здатності та зменшення часу доставки даних від клієнтських станцій до точки доступу.

в) виявлено проблему несправедливого розподілу радіоресурсів у гетерогенній мережі сі IEEE 802.11 та запропоновано метод розв'язання цієї проблеми.

Теоретична і практична значущість. Результати, представлені в роботі, можуть бути використані при проектуванні нових телекомунікаційних протоколів і пристроїв, для створення нових алгоритмів управління передачею даних в бездротових мережах, в освітній програмі ВНТУ.

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

1. МЕРЕЖІ ДОСТУПУ НА ОСНОВІ МЕРЕЖ WI-FI

1.1. Еволюція технології Wi-Fi

Коли у вересні 1990 року відбулося перше засідання проекту IEEE 802.11 1, навряд чи хтось міг уявити, наскільки цей проект змінить наш світ, вплинувши на багато сфер економіки і навіть на звички людей. На сьогоднішній день основний документ, що розробляється в рамках проекту IEEE 802.11 Комітетом стандартизації IEEE 802 LAN/MAN [6] і під назвою «Специфікації контролю доступу до середовища бездротової локальної мережі (MAC) і фізичного рівня (PHY)» перетворилася на широко використовувану технологію, відому як Wi-Fi. У той час як технологія стільникових мереж кожне десятиліття піддається кардинальному ребрендингу, наприклад, зміні назви з «4G» на «5G», для користувачів Wi-Fi збільшення швидкості передачі даних, впровадження нових послуг і поява нових можливостей бездротових мереж практично непомітні. Але це не означає, що Wi-Fi не розвивається.

Яскравим свідченням розвитку Wi-Fi є стрімке зростання номінальних 2-х швидкостей передачі даних в діапазонах 2,4 ГГц/5 ГГц/6 ГГц 3: від 2 Мбіт/с у найпершій версії IEEE 802.11-1997 до приблизно 40 Гбіт/с в останньому IEEE 802.11 на додаток до стандарту [7], також відомого як Wi-Fi 7 [2].

Ще одним підтвердженням розвитку Wi-Fi є розширення сфери застосування технології. Спочатку стандарт IEEE 802.11 розроблявся для вирішення двох завдань: проблеми останньої милі і проблеми побудови децентралізованих мереж. Децентралізовані мережі, або мережі без точок доступу – це мережі, що самоорганізуються, створені з еквівалентних станцій, коли це необхідно, без дротової інфраструктури. У децентралізованих мережах відсутня базова станція та координатор.

Подальші доповнення до стандарту значно розширили сферу застосування технології. Наприклад, в 2011 році було опубліковано доповнення до стандарту IEEE 802.11s, яке дозволило будувати ефективні багатокрокові мережі на базі технології Wi-Fi. У 2012 році з додаванням IEEE 802.11 ad з'явилася можливість побудови високошвидкісних персональних мереж міліметрового діапазону, а в 2017 році була завершена робота над доповненням IEEE 802.11ah, що покращує продуктивність технології Wi-Fi у сценаріях, типових для Інтернету речей.

Всього до 2020 року було підготовлено десятки доповнень до стандарту. У 2007, 2012, 2016 та 2020 роках оригінальний стандарт та всі завершені доповнення були об'єднані та опубліковані як окремі версії стандарту. Розглянемо докладніше еволюцію технології Wi-Fi за даними [1; 2; 7], звернувши увагу на важливі для вирішення завдань роботи доповнення та напрямки розвитку технологій.

1.1.1 Збільшення номінальної швидкості передачі даних

У 1999 році з'явилися перші два доповнення до стандарту: IEEE 802.11a [72] і IEEE 802.11b [3]. Додаток IEEE 802.11 використовував ортогональне мультиплексування з частотним розподілом (OFDM) і набір конструкцій

сигнального коду для досягнення номінальної швидкості передачі даних до 54 Мбіт/с, вказано роботу пристроїв у діапазоні частот 5 ГГц, а не 2,4 ГГц. Пристрої, що підтримують стандарт IEEE 802.11a, спочатку широко не використовувалися. Але популярними стали пристрої, що підтримують IEEE 802.11b і здатні передавати дані зі швидкістю до 11 Мбіт/с в частотному діапазоні 2,4 ГГц.

Оскільки пристрої IEEE 802.11a та IEEE 802.11b працювали на різних частотних каналах, вони не могли передавати дані один одному. Широке поширення пристроїв у діапазоні 2,4 ГГц і потреба у зворотній сумісності змусили розробників Wi-Fi перенести IEEE 802.11a на діапазон 2,4 ГГц. У 2003 році було представлено додаток IEEE 802,11g [74].

Забігаючи наперед, зазначимо, що завдяки введенню OFDM і закріпленню 64 піднесучих у каналі шириною 20 МГц, символ OFDM 3,2 мкс з інтервалом захисту 0,8 мкс, додаток IEEE 802.11 визначив параметри сигналів, що використовуються в подальших доповненнях до стандарту Wi-Fi.

У доповненні IEEE 802.11n [5] номінальна швидкість передачі даних зросла на порядок (до 600 Мбіт/с) за рахунок використання відразу декількох методів. Це:

- подвоєння каналу до 40 МГц;
- використання більш високих швидкостей кодування 5/6 в порівнянні з попереднім максимумом 3/4.
- використання кількох антен для передачі до 4 просторово розділених потоків між парою пристроїв за допомогою методу Multiple Input Multiple Output (MIMO).

Нарешті, надбудова IEEE 802.11ac [6; 7; 7] знову збільшила швидкість передачі даних на порядок в порівнянні з IEEE 802.11n. Крім збільшення числа просторово розділених потоків до 8, IEEE 802.11ac розширив смугу пропускання до 160 МГц (дозволивши використовувати несуміжні підканали 80 + 80 МГц) і збільшив порядок сузір'я до 256-QAM (Квадратурна амплітудна модуляція), що в сукупності збільшило номінальну швидкість передачі даних до 7 Гбіт/с.

Додаток IEEE 802.11ax [1; 6] підняв порядок сузір'я до 1024-QAM, що

дозволяє передавати на 25% більше даних, ніж 256-QAM, що використовується в IEEE 802.11ac. З метою підвищення продуктивності у зовнішніх мережах також були змінені параметри символів OFDM: довжина OFDM-символу збільшилася в чотири рази до 12,8 мкс, збільшивши кількість тонів у чотири рази. Залежно від умов у каналі, пристрої IEEE 802.11 можуть використовувати інтервал захисту 0,8, 1,6 або 3,2 мкс. Як наслідок, стандарт IEEE 802.11 має на 37% вищу номінальну швидкість передачі даних, ніж Wi-Fi 5, що є незначним покращенням у порівнянні з десятикратним збільшенням номінальної швидкості передачі даних, досягнутим, наприклад, у додатках IEEE 802.11n та IEEE 802.11ac. Примітно, що такий низький приріст номінальної пропускної здатності є незначним з маркетингової точки зору: пристрої Wi-Fi 6 тільки-но почали з'являтися в масовому виробництві, коли почалася розробка наступного покоління технології Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) [2].

У травні 2019 року почалася робота над новим доповненням до стандарту Wi-Fi, яке дозволить збільшити номінальну швидкість понад 40 Гбіт/с. Розроблюване доповнення IEEE 802.11be [2; 7] підтримуватиме номінальну швидкість передачі даних вище 40 Гбіт/с, що досягається за рахунок розширення смуги пропускання до 320 МГц і порядку MIMO до 16 потоків, а також за рахунок реалізації 4096-QAM (також іменується 4K-QAMs).

1.1.2 Зниження накладних витрат

Незважаючи на заявлені високі значення, реальні швидкості в мережах Wi-Fi значно нижчі за номінальні. Це пов'язано з великою часткою «накладних витрат», які виникають в мережах Wi-Fi. Наприклад, кожен пакет починається з преамбули, тривалість якої не залежить від сигнально-кодової конструкції, що використовується для передачі даних. Крім того, між пакетами є міжкадрові інтервали і для доступу до каналу потрібен деякий час.

Ранні версії стандарту Wi-Fi дозволяли пристроям передавати пакети тільки по одному. Більш того, після передачі пакета і отримання кадру АСК

(Acknowledgement, підтвердження), що підтверджує його доставку, пристрої повинні відновити доступ до каналу. Збільшення швидкості передачі даних призвело до скорочення передачі корисного навантаження, а час, необхідний для доступу до каналу і відправки преамбули пакета і кадру підтвердження, залишився практично незмінним, тому частка таких накладних витрат значно зросла. І ось чому в рамках додатку IEEE 802.11e [8] був запропонований механізм TXOP (Transmission Opportunity), що дозволяє передавати відразу кілька пакетів після одного доступу до каналу. Щоб мінімізувати накладні витрати, спричинені кадрами підтвердження, у додатку IEEE 802.11e введено підтвердження блоку: Block Acknowledgement, BlockAck). Він дозволяє надсилати кілька пакетів поспіль, а потім підтверджувати їх усі одночасно за допомогою одного кадру BlockAck, який містить бітову маску, що вказує на отримані пакети. Незважаючи на покращення, які були зроблені за допомогою TXOP, кожен пакет даних, як і раніше, містить заголовки канального і фізичного рівнів і є принаймні коротким міжкадровим інтервалом (коротке міжкадровий інтервал-Frame Space, SIFS).

У той час як в IEEE 802.11a/g накладні витрати, викликані заголовками і міжкадровими інтервалами, все ще були прийнятними, в IEEE 802.11n вони стали значними. Наприклад, при номінальній швидкості 600 Мбіт/с 1500 байт даних передається за 20 мкс, що можна порівняти з довжиною преамбули IEEE 802.11(16мкс) або тривалістю SIFS в діапазоні 5 ГГц (16 мкс). Ось чому в додатку IEEE 802.11n[7] були введені методи агрегації пакетів: A-MSDU (Aggregated MAC Service Data Unit) і A-MPDU (Aggregated MAC Protocol Data Unit) і A-MPDU (Aggregated MAC Protocol Data Unit) – агрегований блок даних протоколу підрівня доступу до каналу), який дозволяє пристроям надсилати кілька пакетів в одному довгому кадрі.

Агрегований кадр має єдину преамбулу, а міжкадрові інтервали між агрегованими пакетами відсутні.

При A-MSDU в кадр поміщається один загальний заголовок канального рівня, а контрольна сума обчислюється по всій сукупності агрегованих пакетів.

Тому навіть при короткочасній заваді втрачається весь A-MSDU.

При A-MPDU кожен пакет в агрегованому кадрі має власний заголовок, порядковий номер і контрольну суму. Використання цього методу агрегації підвищує надійність передачі в порівнянні з A-MSDU, дозволяючи декодувати хоча б деякі пакети в разі коротких сплесків шуму за рахунок незначного збільшення накладних витрат. Для цього пакети розділяються спеціальною короткою послідовністю біт. Якщо частина агрегованих пакетів втрачена, приймальний пристрій може визначити початок наступних пакетів з цієї послідовності і спробувати їх декодувати.

Незважаючи на те, що додаток IEEE 802.11ac описує методи передачі даних зі швидкістю до 7 Гбіт/с, для досягнення такої високої номінальної швидкості потрібно, щоб і передавальний, і приймальний пристрої мали 8 антен. Хоча ця вимога є здійсненою для точок доступу, багато пристроїв користувача, таких як смартфони, ноутбуки та планшети, мають менше 8 антен і тому вони не можуть одночасно приймати або передавати 8 просторово розділених потоків. Через це знижується швидкість передачі даних. Розробники IEEE 802.11ac вирішили цю проблему втрати продуктивності, впровадивши метод низхідного каналу зв'язку DL MU-MIMO (DL) в Wi-Fi). Цей метод дозволяє точці доступу призначати різні просторові потоки різним користувачам. У той же час підтримка висхідної багатокористувацької передачі вимагає синхронізації клієнтських пристроїв, тому вона була реалізована тільки в Wi-Fi в складі доповнення IEEE 802.11ax [1; 6].

Багатокористувацькі передачі також вигідні з точки зору зниження накладних витрат, оскільки на практиці можлива наявність невеликих ділянок даних про точку доступу, які призначені для різних станцій. Багатокористувацька передача даних дозволяє передавати ці дані разом, що зменшує накладні витрати на заголовки кадрів і доступ до каналів.

Одним з ключових нововведень в IEEE 802.11 ax є впровадження в технологію Wi-Fi ортогонального частотно-частотного множинного доступу (OFDMA), яка дозволяє станціям виділяти невеликі частини частотно-часових

ресурсів, що забезпечують найкраще співвідношення потужності сигналу до відношення сигнал/шум (SNR). На додаток до підвищення спектральної ефективності, OFDMA зменшує накладні витрати, дозволяючи надсилати дані від різних користувачів в одному кадрі та підтверджувати отримання всіх даних у наступному кадрі.

Повнодуплексний і неортогональний множинний доступ також можуть бути використані для підвищення ефективності багатокористувацьких передач.

У 2018–2019 роках було вивчено впровадження та використання повнодуплексної передачі даних у мережах Wi-Fi у складі Full-Duplex Topic Interest Group (FD TIG) групи IEEE 802.11 [7; 8]. Повнодуплексна передача даних в мережах Wi-Fi означає, що пара пристроїв може передавати дані один одному за допомогою одних і тих же радіоресурсів і антен. Таким чином, використання повнодуплексної передачі даних по бездротовому каналу призводить до необхідності боротьби з завадами від передачі на рівні 16 дБп і вище при прийомі сигналу потужністю 82 дБп і нижче, що вимагає досить точного віднімання сигналів, потужності яких відрізняються в мільярди разів. Хоча в даний час існують прототипи, здатні виконувати таку операцію, доцільність впровадження повнодуплексного режиму передачі в стандарт Wi-Fi не зовсім зрозуміла. Дійсно, повнодуплексна передача даних теоретично може подвоїти сукупний обсяг даних, що передаються між парою пристроїв. Однак для цього обсяг даних, що передаються в одному напрямку, повинен дорівнювати обсягу даних, що передаються в протилежному напрямку. Насправді, в мережах Wi-Fi низхідний трафік більш поширений, ніж висхідний, а низхідні та висхідні пакети надходять у різні моменти часу, що значно знижує оцінку приросту продуктивності, що досягається повнодуплексною передачею. У той же час реалізація повнодуплексної передачі вимагає змін як на фізичному, так і на каналному рівнях і ускладнює роботу пристроїв.

На відміну від повнодуплексної передачі, неортогональний множинний доступ дозволяє точці доступу одночасно обслуговувати кілька станцій паралельно (або передавати на них дані, або отримувати від них дані),

використовуючи одну і ту ж антену і одні і ті ж частотно-часові ресурси. Наприклад, точка доступу може передавати зважену суму двох сигналів, кожен з яких відповідає окремому пакету: перший пакет призначений для станції, розташованої далеко від точки доступу, а другий - для станції, розташованої поблизу. Тоді станція, віддалена від точки доступу, отримує свій сигнал, сприймаючи інше як шум. Сусідня станція також отримує сигнал, призначений для віддаленої станції, сприймаючи інше як шум. Потім, використовуючи методи завадостійкого кодування, він реконструює спочатку переданий сигнал далекої станції, усуваючи помилки і спотворення, що вносяться в канал, і віднімає відновлений сигнал з отриманого сигналу. В результаті з'являється сигнал, призначений для сусідньої станції. Як зазначалося в багатьох теоретичних роботах, такий підхід підвищує продуктивність в мережах зі значно відмінними умовами каналу між точкою доступу і пов'язаними з нею станціями. Неортогональний доступ у бездротових мережах добре вивчений аналітично, за допомогою імітаційного моделювання, а також експериментально [14]. У той же час більшість теоретичних робіт через приблизні припущення, що полегшують розрахунки, дають занадто неточні оцінки приросту продуктивності, які можуть бути отримані за рахунок використання неортогонального доступу. Часто робляться припущення про стаціонарність каналу, плоский канал з ABGS, ідеальна оцінка каналу у передавача/приймача та інше, описаний перший в світі прототип Wi-Fi-пристроїв, що підтримують неортогональний доступ, за допомогою якого було встановлено, що він може забезпечувати продуктивність до 35% в залежності від сценарію використання. Однак є проблеми спільного використання неортогональний доступ та MU-MIMO та питання, пов'язані з оцінкою приросту продуктивності від неортогонального доступу, залишаються відкритими, а неортогональний доступ не реалізований у стандарті Wi-Fi на момент написання статті. Однак деякі результати роботи, наприклад, алгоритми планування радіоресурсів, можуть бути розширені і використані з неортогональним доступом, що робиться, наприклад, в [4].

1.1.3 Виконання вимог якості обслуговування

З першими версіями технології Wi-Fi з'явилася задача задоволення вимог до якості обслуговування (QoS) трафіку. Зокрема, існуючі методи доступу до каналу, відомі як Розподілена координаційна функція (DCF) і функція координації точок, PCF4, IEEE 802.11e[8] додали два нових механізми: механізм розширеного розподіленого доступу до каналу (EDCA) і гібридну координаційну функцію Controlled Channel Access (HCCA)) забезпечують випадковий і детермінований доступ до каналу відповідно. Доповнення забезпечує диференційоване обслуговування голосових і відеопотоків, Best Effort і фонових трафіку. EDCA призначає різні пріоритети цим типам трафіку, змінюючи параметри методу випадкового доступу до каналу. В результаті, наприклад, затримка для голосового трафіку менша, ніж для трафіку негарантованої доставки. Однак EDCA не відповідає параметризованим вимогам QoS, включаючи забезпечення того, щоб затримка не перевищувала заданого значення. Більш складний механізм HCCA дозволяє точці доступу планувати передачу на основі конкретних вимог QoS, таких як обмеження затримки, швидкість втрати пакетів або вимоги до пропускну здатності.

Якщо кілька точок доступу працюють в одній зоні та використовують детермінований доступ до каналів зв'язку, їхні графіки передачі можуть конфліктувати. Ця проблема частково вирішується механізмом переговорів HCCA TXOP, запровадженим у стандарті IEEE 802.11aa [9]. Цей механізм дозволяє різним точкам доступу резервувати різні часові інтервали для передачі, спілкуючись один з одним. На жаль, HCCA TXOP Negotiation дозволяє уникнути лише колізій між точками доступу, які можуть взаємодіяти між собою [5]. Крім того, HCCA TXOP Negotiation не усуває колізії між точкою доступу та прихованими клієнтськими станціями сусідніх мереж, які все ще можуть використовувати довільний доступ до каналу через зарезервовані проміжки часу.

Розробка додатків реального часу (Real-Time Applications, RTA), включаючи ігри, додатки віртуальної та доповненої реальності, а також різні

промислові додатки, призвела до розробки вдосконалених методів підтримки таких додатків в мережах Wi-Fi, що забезпечують затримку до 10 мс. Зокрема, підтримка додатків реального часу є однією з цілей розвитку IEEE 802.11be [17], який розпочався у травні 2019 року. З існуючими методами доступу стандарту, однієї лише високої швидкості передачі даних недостатньо для підтримки додатків у реальному часі, оскільки пакети можуть довго чекати, поки з'єднання перейде в режим очікування або попередні пакети будуть оброблені. Таким чином, крім забезпечення високих швидкостей передачі даних, доповнення до стандарту IEEE 802.11be має змінити правила доступу до каналів.

1.1.4 Інтерференція у Wi-Fi

Традиційно в мережах Wi-Fi використовується ряд підходів для зменшення інтерференції (завад) від сусідніх станцій.

Перший - прослуховування каналу перед передачею: всі механізми доступу до каналів в мережах Wi-Fi засновані на методі CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) [6; 9].

По-друге, це метод RTS/CTS (Request to send/Clear to send). Він дозволяє парі пристроїв резервувати канал для подальшої передачі даних, обмінюючись спеціальними короткими кадрами управління, RTS і CTS. У полі «Duration» тривалість цих кадрів вказує на час, необхідний для передачі даних і кадру підтвердження. Незважаючи на те, що передача кадрів RTS/CTS збільшує накладні витрати, використання цього підходу стає вигідним у наступних випадках: по-перше, при передачі довгих кадрів даних RTS/CTS скорочує тривалість зіткнення, оскільки час, необхідний для передачі RTS, набагато менший, ніж час кадру даних. По-друге, в деяких (але не у всіх) сценаріях RTS/CTS дозволяє боротися з проблемою прихованих станцій. Зокрема, RTS/CTS неефективна в багатоступінчастих мережах [9–10].

Підтримка багатокрокових або Wi-Fi Mesh-мереж була представлена в додатку IEEE 802.11s [11] в 2011 році. Подібно до мережі без точок доступу,

mesh-мережа складається з еквівалентних станцій. Однак, на відміну від мережі без точок доступу, ці станції можуть передавати інформацію один одному через проміжні ретрансляційні вузли. Поряд з очевидними і досить добре вивченими компонентами IEEE 802.11, такі як протокол маршрутизації [12; 13], який є Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP)[6; 14], і протокол для управління зв'язком з сусідніми станціями [15] і метрика маршрутизації, що враховує споживання ресурсів каналу, доповнення містить опис нового механізму доступу до каналів зв'язку - МССА (Mesh координаційна функція Coordinated Channel Access), що дозволяє мережевим станціям заздалегідь резервувати періодичні послідовності часових інтервалів, коли тільки одна зі станцій зможе передавати дані, а сусіднім станціям доведеться утриматись від доступу до каналу. Необхідність створення нового методу множинного доступу була викликана проявом недоліків довільного доступу в багат шарових мережах, продуктивність яких знижується в багатоступінчастій бездротовій мережі через вплив прихованих станцій [16].

Оскільки приховані станції не можуть бачити радіопередачу один одного, прослуховування оператора марно, і одна станція може почати передачу, а інша вже передає пакет. В результаті відбуваються часті зіткнення. Як показано в [17], наявність прихованих станцій призводить до значного зниження швидкості передачі в мережі, а в деяких випадках і до блокування зв'язку між станціями, що може привести не тільки до зниження продуктивності мережі, але і до порушення її зв'язності. Неможливо використовувати МССА в Mesh-мережі Wi-Fi, оскільки немає єдиного координатора для планування мережі. Доступність у додатку IEEE МССА 802.11s дозволяє станціям розподілено планувати розклад і обмінюватися розкладами з сусідніми станціями, щоб уникнути зіткнень.

Розроблений на початку 2021 року додатковий компонент IEEE 802.11ax (Wi-Fi6) покращує продуктивність технології в «традиційному додатку Wi-Fi»: проблема останньої милі. Однак умови, в яких функціонують сучасні мережі Wi-Fi, значно відрізняються від тих, що були десятирічної давності, і це знайшло відображення в нових методах передачі даних, описаних у додатку IEEE 802.11ax. Сьогодні Wi-Fi практично повністю витіснив дротовий доступ до інтернету.

Його стрімко зростаюча популярність призвела до збільшення щільності мереж Wi-Fi, як за кількістю пристроїв у бездротовій мережі, так і за кількістю бездротових мереж, які працюють поряд. Збільшення внутрішньо- і міжмережових інтерференцій знижує продуктивність попередніх поколінь бездротових мереж, стандарти яких не враховують нових реалій.

Незважаючи на те, що IEEE 802.11ax часто розглядається як покращення IEEE 802.11ac [7], його розробка була пов'язана зі зміною парадигми. Замість того, щоб збільшувати номінальну швидкість передачі даних на порядок, як це було у випадку з IEEE 802.11n і IEEE 802.11ac, розробники IEEE 802.11ax орієнтований на завдання більш ефективного використання частотно-часових радіоресурсів в умовах високих інтерференцій. Крім вищезгаданого OFDMA, який може бути використаний для боротьби з частотно-селективною інтерференцією, важливою частиною нового доповнення є набір методів, спрямованих на зниження завад в щільних мережах. Зокрема, в IEEE 802.11ax удосконалено метод прослуховування каналів та адаптивного вибору потужності, метод віртуальної зайнятості каналу, а також методи, що дозволяють отримати доступ до каналу за розкладом.

1.1.5 Підтримка великої кількості малопотужних пристроїв

Великий успіх технології Wi-Fi, а також неймовірний інтерес до Інтернету речей з його величезним ринком, що налічує мільярди пристроїв спонукали розробників Wi-Fi адаптувати технологію для сценаріїв IoT. Додаток IEEE 802.11ah дозволив за допомогою єдиної точки доступу забезпечити доступ до інтернету тисячам автономних пристроїв з низьким енергоспоживанням, а відповідна технологія отримала назву Wi-Fi HaLow. Очікується, що IEEE 802.11ah буде використовуватися в розумних будинках, розумному виробництві та розумному сільському господарстві [3].

Технологія Wi-Fi HaLow дозволяє підключати до однієї точки доступу до 8000 станцій, які працюють на частотах менше 1 ГГц і використовують набагато

вужчі канали, ніж «традиційний» Wi-Fi: від 1 до 16 МГц (у порівнянні з каналами 160 МГц, що використовуються в мережах IEEE 802.11ac). Низькі частоти і вузькі канали при однаковій потужності дозволяють збільшити відстань для надійної передачі на найнадійнішій кодовій конструкції сигналу до 500-1000 м. У додатку IEEE 802.11ah також описані різноманітні механізми, що дозволяють значно знизити енергоспоживання пристроїв. Ключовими з них є вікно обмеженого доступу (RAW) і Target Wake Time (TWT), які розглядаються в роботі. Зокрема, RAW дозволяє виділяти часові інтервали, коли тільки задана підмножина станцій може передавати дані, а TWT дозволяє планувати активність пристрою та інтервали сну.

Крім того, додаток IEEE 802.11ah містить ряд механізмів, спрямованих на розвантаження стільникових мереж шляхом маршрутизації трафіку мобільних пристроїв по мережах Wi-Fi HaLow, а не по стільникових мережах. Для останнього сценарію IEEE 802.11ah підтримує досить високу швидкість передачі даних, до 350 Мбіт/с на каналі 16 МГц.

1.1.6 Високошвидкісні Wi-Fi персональні мережі міліметрового діапазону

Дефіцит радіочастотних ресурсів в традиційних діапазонах Wi-Fi 2,4 і 5 ГГц викликає інтерес розробників Wi-Fi до міліметрового діапазону хвиль і оптики. Першим доповненням до стандарту Wi-Fi, що дозволило роботу на частотах близько 60 ГГц, стало рекламне доповнення IEEE 802.11, опубліковане у 2012 році. Це доповнення визначило правила створення високошвидкісних бездротових персональних мереж з спрямованими передачами.

У зв'язку з високими втратами, властивими діапазону 60 ГГц і широкому каналу (близько 2 ГГц), пристрої змушені використовувати спрямовані передачі для досягнення високих швидкостей. На щастя, коротка довжина хвилі дозволяє розмістити необхідну антенну решітку безпосередньо на мікросхемі з площею радіомодуля менше 1 см². У той же час традиційний довільний доступ Wi-Fi до

каналу не є ефективним при спрямованій передачі, оскільки і передавальний, і приймальний пристрої повинні відповідним чином налаштувати свої антени під час передачі. Ось чому в IEEE 802.11ad використовується запланований доступ до каналу. Необхідність попереднього планування передачі та резервування ресурсів каналу ускладнює детермінований доступ до каналів. Однак, з іншого боку, заплановані спрямовані передачі дозволяють використовувати одні й ті ж радіоресурси різними пристроями, які знаходяться близько один до одного без колізій. Крім того, графік може бути складений з урахуванням вимог до якості обслуговування, а значить, вони можуть бути гарантовані. Ці властивості в поєднанні з високою номінальною швидкістю передачі даних (до 7 Гбіт/с) і невеликим радіополем (близько 10 м) роблять технологію, описану в IEEE 802.11ad, перспективною для високошвидкісних персональних мереж і використання для заміни проводів у центрах обробки даних, домашніх медіа та розважальних системах.

Технологія Wi-Fi міліметрового діапазону ще більше вдосконалена завдяки новому доповненню IEEE 802.11ay, яке є еволюцією IEEE 802.11ad, що дозволяє передавати дані в 4 рази ширшими каналами та 8 просторово розділеними потоками завдяки технології MIMO. Таким чином, IEEE 802.11ay забезпечує більш ніж у 30 разів вищу номінальну швидкість передачі даних, ніж IEEE 802.11ad.

Що стосується роботи Wi-Fi в оптичному діапазоні, то ця технологія тільки в даний час розробляється. Планується, що вона забезпечить високошвидкісний доступ до інтернету на робочі місця в офісах, а точками доступу стануть світлодіодні лампи.

1.2. Архітектура мережі Wi-Fi

1.1.7 Інфраструктурні мережі

Інфраструктурні мережі Wi-Fi складаються з точки доступу, до якої

клієнтські станції підключаються бездротовим способом, див. 1.2. В рамках такої архітектури доступ до середовища може здійснюватися централізованими або розподіленими методами. У першому випадку точка доступу монополізує доступ до середовища, запобігаючи колізії (одночасну передачу пакетів різними станціями), а так як при відсутності точки доступу клієнтські станції все одно не можуть підключитися до провідної мережі, надання їй виключних прав не знижує надійність мережі в цілому. У другому випадку здійснюється доступ до навколишнього середовища на конкурсній основі і всі клієнтські станції, а також сама точка доступу змагаються за право передавати свої пакети. При цьому навіть при розподіленому управлінні точка доступу може контролювати параметри алгоритму доступу каналів пов'язаних з нею станцій.

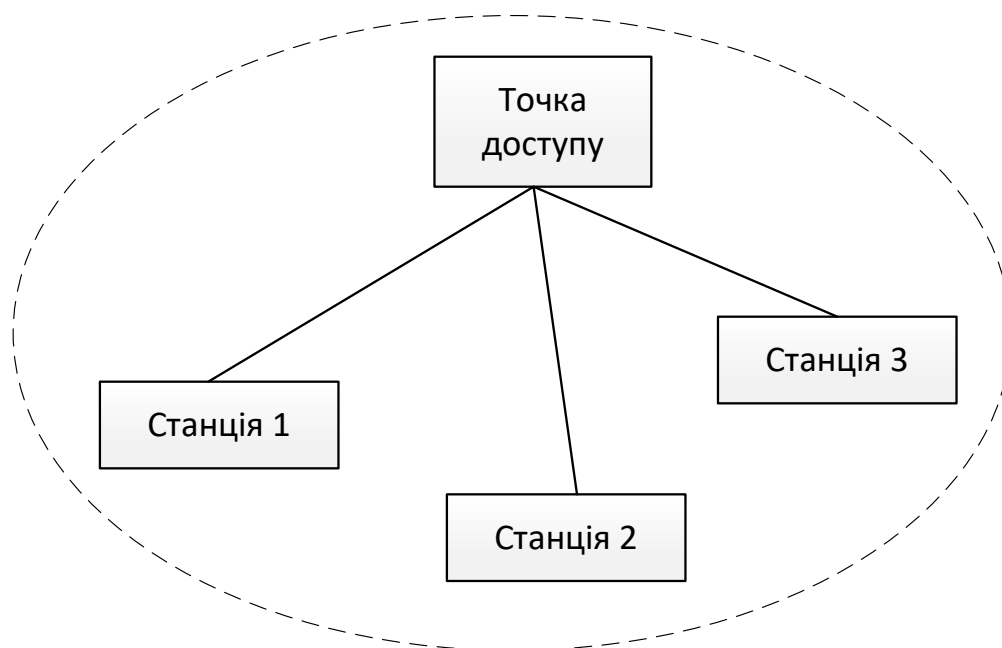


Рисунок 1.2 – Мережа інфраструктури Wi-Fi

Для того, щоб періодично розсилати службову інформацію і вказувати на її присутність в мережі, точка доступу періодично генерує службові кадри, які називаються маяками. Період генерації маяка називається інтервалом маяка. Після створення маяка точка доступу отримує доступ до каналу та надсилає маяк.

Маяки, зокрема, використовуються для зниження енергоспоживання. Ключова ідея багатьох механізмів зниження потужності, що використовуються

в мережах Wi-Fi, заснована на здатності станції час від часу вимикати та вмикати свій ефірний інтерфейс. Коли радіоінтерфейс увімкнено, кажуть, що станція не спить і може приймати та передавати кадри. Коли радіоінтерфейс вимкнено, станція перебуває в режимі сну і не може ні приймати, ні передавати дані. Станція може працювати у двох режимах: у режимі енергозбереження (PS) він перемикається між неспанням і сном, тоді як в активному режимі він завжди не спить.

В інфраструктурних мережах станція повинна сповістити точку доступу, перш ніж вона змінить режим роботи. Коли станція перебуває в режимі енергозбереження, точка доступу зберігає всі кадри (за винятком деяких типів рамок керування), призначені для цієї станції. Для того, щоб сповіщати станцію в режимі енергозбереження збережених пакетів, точка доступу включає в маяки спеціальний інформаційний елемент TIM (Traffic Indication Map). TIM вказує на наявність збережених даних, призначених для кожної станції. Станція, що працює в енергозберігаючому режимі, періодично прокидається для отримання маяка. Не обов'язково брати кожен маяк, і стан сну може тривати довше, ніж інтервал маяка. Якщо збережених пакетів для станції немає, вона повертається в режим очікування відразу після маяка. В іншому випадку станція відправляє запит PS-Poll: Power Save Poll - запит від механізму енергозбереження) для отримання збережених даних. У відповідь на PS-опитування точка доступу відправляє збережені кадри даних. У випадку з багатоадресними даними, тобто даними, призначеними для декількох користувачів одночасно, вони передаються наступним чином. Вісь часу розбивається на інтервали, які називаються інтервалами DTIM. Delivery Traffic Indication Message), які складаються з декількох інтервалів beacon і розділені спеціальними беконами, які називаються DTIM beacon. Кожен TIM визначає кількість інтервалів beacon до найближчого маяка DTIM. Таким чином, чуючи будь-який маяк, що містить елемент TIM, станція знає, коли буде DTIM-маяк. Багатоадресний трафік передається відразу після маяка DTIM. Оскільки станції в режимі енергозбереження, швидше за все, будуть прослуховувати маяки DTIM, корисно використовувати запланований

час їх відправки в якості орієнтирів на осі часу.

Оскільки зона покриття однієї точки доступу невелика, при розгортанні мереж в готелях, торгових центрах, аеропортах, університетах, великих підприємствах та інших промислових і соціальних об'єктах кілька інфраструктурних мереж об'єднуються в одну розширену мережу, яка має однойменну назву і забезпечує доступ до одного і того ж набору послуг. Такі мережі, а також окремі інфраструктурні мережі, розгорнуті одним оператором (наприклад, оператором, що надає доступ до мережі Інтернет у багатоквартирному будинку), можуть бути підключені до централізованого контролера, який керує налаштуваннями точки доступу. Такий контролер також може надавати нові можливості для координації доступу до каналу, включаючи синхронізацію часу, потужності передачі даних та використовуваних підканалів. Таке узгодження точок доступу в даний час багато що обумовлено фірмовими рішеннями від виробників мережевого обладнання. Однак ця тема широко обговорюється в підгрупі TGbe, яка розробляє нове доповнення до стандарту Wi-Fi IEEE 802.11be. Очікується, що координація точок доступу буде підтримуватися на стандартному рівні і забезпечить значний приріст продуктивності в мережах Wi-Fi [2].

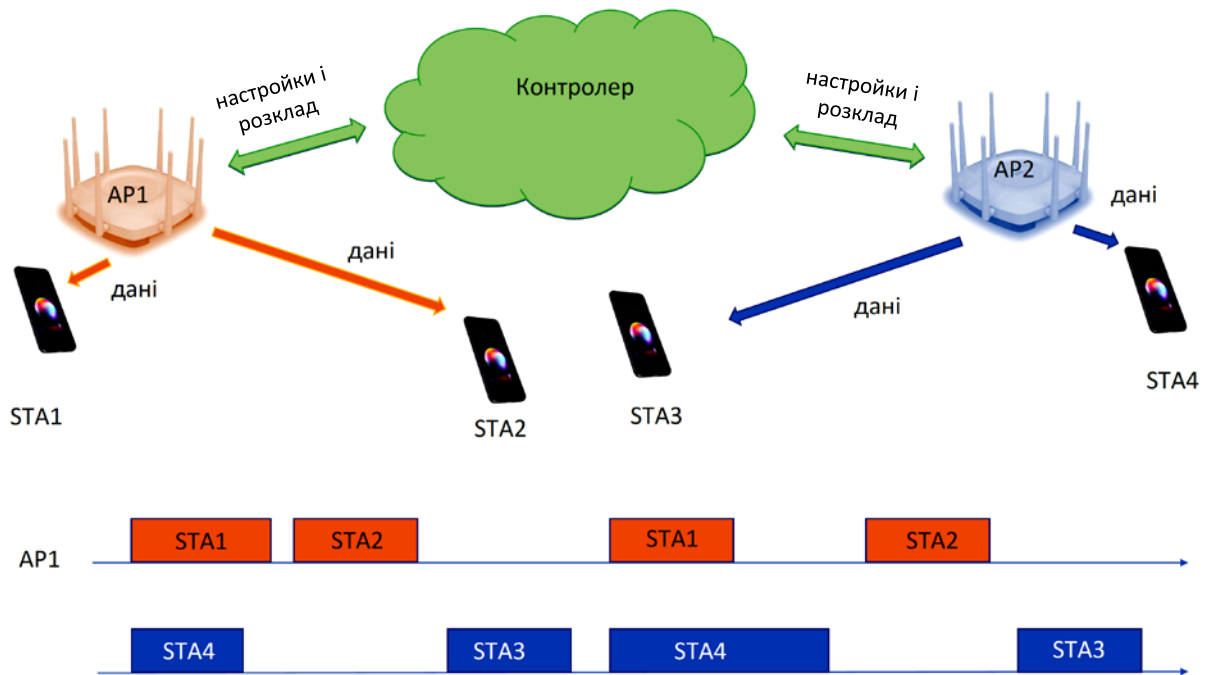


Рисунок 1.3 – Хмарне управління Wi-Fi інфраструктурою

1.1.8 Мережі без точок доступу

Іншим типом мережі Wi-Fi є мережі без точок доступу, які є мережами, що самоорганізуються, створеними з еквівалентних станцій, коли це необхідно, без дротової інфраструктури. Хоча в таких мережах можна було б призначити координатора, це знизило б надійність мережі. Дійсно, вихід з ладу пристрою-координатора перериває роботу мережі, незважаючи на те, що цей пристрій не виконує ніяких функцій, які не змогли б виконати інші станції. Саме тому при вирішенні проблеми побудови децентралізованих мереж в мережах Wi-Fi зазвичай використовується контроль доступу по розподіленому каналу. Маяки в таких мережах генеруються всіма станціями одночасно, але відправляються вони з випадковою затримкою. При цьому в кожному інтервалі маяка станції, які чують, що маяк вже відправлений, скасовують свою передачу.

1.1.9 Бездротові персональні мережі міліметрового діапазону

Доповнення IEEE 802.11ad та IEEE 802.11ay дозволяють використовувати технологію Wi-Fi для багатогігабітних бездротових персональних мереж (LAN)

з використанням радіочастот міліметрового діапазону (~60 ГГц). Робота в діапазоні 60 ГГц, з одного боку, забезпечує високу пропускну здатність, але, з іншого боку, призводить до значного ослаблення рівня сигналу і скорочення дальності передачі. Щоб розширити діапазон мереж, надбудова IEEE 802.11ad дозволяє пристроям використовувати спрямовані передачі.

Ефективні спрямовані передачі міліметрового діапазону вимагають планування, і, як наслідок, виникає потреба в багатоканальному координаторі доступу для станцій, що працюють в одній мережі. Цей координатор може бути точкою доступу, яка є шлюзом до Інтернету, але не обов'язково мати цю функцію, щоб стати координатором. Рекламний додаток IEEE 802.11 дає змогу вибрати координатором будь-який одноранговий пристрій, якщо він здатний виконувати функції координатора.

Такий персональний мережевий координатор IEEE 802.11 ad/ay періодично розсилає маяки і планує передачі: весь інтервал маяка розрізається на підінтервали, кожен з яких доступний для передачі даних між парою станцій або для передачі даних більш широкою групою станцій.

1.1.10 Багатоступінчасті мережі

Щоб розширити покриття мережі та забезпечити безперебійну роботу рухомих станцій, додаток IEEE 802.11s визначив набір функцій для побудови багаторівневих мереж Wi-Fi, також відомих як Wi-Fi Mesh. Розширене покриття мережі означає, що хоча мережа в цілому залишається підключеною, деякі станції знаходяться поза зоною дії радіозв'язку одна одної, тому пакети необхідно ретранслювати через проміжні станції, щоб доставляти пакети між ними. Рух станцій означає, що топологія мережі змінюється з часом, і станції можуть перебувати в зоні радіовидимості один одного під час їх роботи. за межами цієї зони.

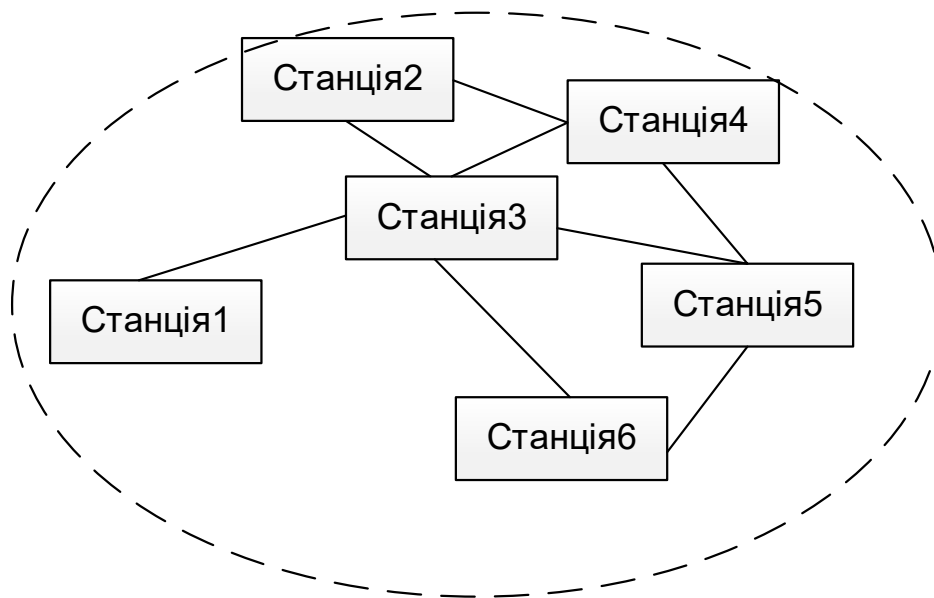


Рисунок 1.4. Багатоступінчаста мережа Wi-Fi

Багатоплощинна Mesh-мережа Wi-Fi - це однорангова мережа, в якій кожна станція повинна мати функціональність, необхідну для належного функціонування багатоплощинної мережі. Зокрема, маяки періодично надсилаються кожною станцією. При цьому, на відміну від мереж ad hoc, маяк не скасовується при прийомі маяків сусідніх станцій. Маяки є найпростішим способом визначення поточного набору в будь-який момент часу. За допомогою маяків синхронізуються годинники на всіх станціях мережі і періодично відправляється службова інформація.

Оскільки успішна доставка маяків на сусідні станції має вирішальне значення для забезпечення високої продуктивності мережі, стандарт описує спеціальний механізм запобігання зіткненням Mesh Beacon (MBCA).

Згідно з цим механізмом, кожна станція розміщує в своєму маяку позначки часу прийому маяків сусідніх станцій. Таким чином, прослуховуючи навколишнє середовище після включення протягом деякого часу і приймаючи маяки сусідніх станцій, станція може визначати моменти ТВТТ (Target Beacon Transmission Time) відправки маяків всіх сусідніх станцій і сусідів сусідніх станцій. Сукупність станцій, що складається з самої станції, її сусідів і сусідів сусідніх станцій, буде називатися двоступеневим середовищем станції.

Виходячи з інформації про час ТВТТ відправки чужих маяків, станція вибирає момент ТВТТ для відправки свого маяка таким чином, щоб він знаходився принаймні на такій же відстані від маяків інших станцій у двоступеневому середовищі, як і на очікувану тривалість маяка. Крім того, станціям забороняється передавати дані в часові проміжки часу, коли станції в двокроковому середовищі передають маяки. Таким чином, механізм МВСА захищає маяки від колізій.

1.3. Удосконалений широкосмуговий зв'язок

1.3.1 Особливості довільного доступу до каналів у мережах Wi-Fi

Стандарт IEEE 802.11 визначає набір правил пересилання пакетів, які забезпечують розподілений паралельний доступ до середовища. У мережах Wi-Fi основним механізмом доступу до середовища є функція розподіленої координації (DCF), яка заснована на методі CSMA/CA. Відповідно до CSMA/CA, пристрій прослуховує канал перед передачею свого кадру і передає кадр тільки в тому випадку, якщо канал вільний. В іншому випадку пристрій затримує передачу кадру до тих пір, поки канал не звільниться. Оскільки кілька пристроїв можуть затримувати передачу, ймовірність колізій (одночасна передача кількома станціями) відразу після зайнятого інтервалу часу стає високою. Щоб зменшити цю ймовірність, використовується усічена двійкова процедура експоненціального відстрочення, а час відстрочки відраховується тільки тоді, коли канал вільний. Крім того, процедура RTS/CTS може бути використана для

скорочення тривалості зіткнень.

У сучасних мережах Wi-Fi DCF зазвичай замінюється вдосконаленим методом розподіленого доступу для середовища EDCA, описаним у додатку IEEE 802.11e, який забезпечує диференційоване обслуговування різних типів трафіку. EDCA розділяє трафік відповідно до вимог QoS на 4 категорії AC (Access Category), перераховані нижче в порядку убутання пріоритету.

- AC_VO – голосовий трафік;
- AC_VI – відеотрафік;
- AC_BE – негарантований трафік доставки;
- AC_BK – фоновий трафік.

Для кожної категорії доступу ведеться окрема черга і призначаються параметри доступу до каналів.

1.3.2 Періодичне резервування

У сценаріях, що вимагають ширококутвого зв'язку, важливим завданням є доставка мультимедійних даних в режимі реального часу, які складають значну частину трафіку. Такий трафік генерується такими популярними програмами, як YouTube, IPTV, VoIP, онлайн-іграми та конференціями. Ці програми в режимі реального часу мають вимоги до якості обслуговування (QoS), які вимагають, щоб мережа надавала потокові дані з обмеженою затримкою та коефіцієнтом втрати пакетів (PLR)). Рішення цієї проблеми відображено в недавніх доповненнях до стандарту Wi-Fi, а саме IEEE 802.11s, IEEE 802.11aa, IEEE 802.11ad, IEEE 802.11ax та інших. Наприклад, додаток IEEE 802.11aa IEEE 802.11 ad і IEEE 802.11ay дозволяють передавати нестиснені мультимедійні потоки за допомогою радіочастот міліметрового діапазону, а одне з останніх доповнень, IEEE 802.11be, розробляється для підтримки додатків в реальному часі.

Розроблена для роботи в неліцензованому радіочастотному діапазоні,

технологія Wi-Fi особливо сприйнятлива до завад, властивих щільним і багатоступінчастим бездротовим мережам [4]. Ефективність довільного доступу значно знижується через вплив прихованих станцій, що ускладнює виконання вимог якості обслуговування. Саме тому робоча група IEEE 802.11 активно використовує доступ до каналів за розкладом в останніх доповненнях до стандарту Wi-Fi. Хоча навіть найраніші версії стандарту Wi-Fi включають необов'язкові механізми доступу до каналів зв'язку, такі як раніше згаданий PCF, які є неефективними при розгортанні щільних мереж, багатоступінчастих і сенсорних мережах.

Ситуацію можна виправити, запровадивши координацію між різними пристроями Wi-Fi централізованим або розподіленим способом. Розподілена координація використовується в багатоступінчастих мережах Wi-Fi (IEEE 802.11s) і мережах Wi-Fi міліметрового діапазону (IEEE 802.11ad/IEEE 802.11ay). У стандарті IEEE 802.11aa координація між точками доступу також може здійснюватися розподіленим способом. Однак сучасні комерційні мережі інфраструктури Wi-Fi можуть мати централізований контролер, який керує налаштуваннями точки доступу. Такий контролер також може надавати нові можливості для координації доступу до каналу, включаючи синхронізацію розкладу, потужності передачі даних, а також використовуваних підканалів.

Як централізовані, так і розподілені методи координації точок доступу не забезпечують миттєву та наднадійну синхронізацію графіків передачі між пристроями. Щоб впоратися з цими обмеженнями, вищезгадані доповнення до стандарту Wi-Fi описують ряд механізмів резервування. Хоча ці механізми були розроблені для різних випадків використання і тому відрізняються способом їх реалізації та використовуваними протокольними повідомленнями, всі вони втілюють одну й ту саму ідею. Всі механізми резервують канал (а) заздалегідь, щоб дати час для відправки інформації про резервування сусіднім вузлам, і (б) періодично, тобто зарезервовані інтервали часу рівновіддалені один від одного і мають однакову тривалість (рис. 1.5). Такий підхід зменшує накладні витрати, пов'язані з узгодженням параметрів резервування та розподілом зарезервованих

слотів між сусідніми пристроями. Дійсно, всю послідовність зарезервованих часових інтервалів, іменованих далі просто резервуваннями, можна описати за допомогою всього трьох параметрів:

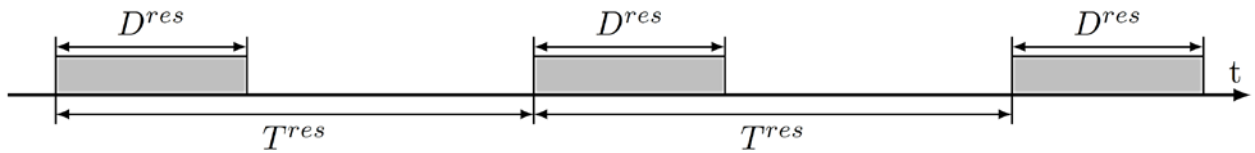


Рисунок 1.5 – Періодичне резервування каналів в мережах Wi-Fi

1. початок першого зарезервованого інтервалу,
2. тривалість D^{res} кожного інтервалу, а
3. T^{res} період, тобто час між початком двох послідовних зарезервованих інтервалів.

Можлива кількість передач пакетів в кожному зарезервованому інтервалі залежить від тривалості пакета і використовуваної схеми передачі даних (рис. 1.6). Можливе також встановлення багаторазового резервування між парою станцій.

1.3.3 Особливості резервування каналів за розкладом у мережах IEEE 802.11be (Wi-Fi 7)

До сих пір стандарти Wi-Fi, як правило, обмежувалися каналним і фізичним рівнями, а обмін інформацією між пристроями явно вказується тільки для ефірного інтерфейсу. Тим часом багато виробників Wi-Fi пристроїв (включаючи Cisco/Miraki, Huawei, HP/Aruba Networks, Quantenna Communications та інші) розробили спеціальне програмне забезпечення, здатне збирати статистику і управляти великими мережами Wi-Fi, що містять велику кількість точок доступу. Такі системи використовуються в багатьох офісних мережах і житлових будинках, де один оператор розгортає точки доступу і віддалено стежить за їх поведінкою. Крім налаштування параметрів конфігурації

точок доступу, такі системи мають набагато багатші можливості.

IEEE 802.11be є першим стандартом, який, як очікується, використовуватиме такі можливості, зокрема для підтримки додатків у реальному часі та забезпечення ефективного використання каналів у щільних мережах. Незважаючи на те, що додаток в даний час знаходиться на ранніх стадіях розробки без затвердженого проекту стандарту, робоча група IEEE 802.11 обговорює ряд ідей щодо узгодженого графіка передачі.

Розглянемо дві точки доступу, кожна з яких має дві підключені станції. Станції STA1 і STA4 знаходяться набагато ближче до власних точок доступу, ніж до чужих. Таким чином, точки доступу можуть передавати свої дані одночасно, використовуючи один і той же частотно-часовий ресурс каналу. У той же час STA2 і STA3 знаходяться далеко від власних точок доступу і можуть відчувати серйозні перешкоди від сусідніх точок доступу. Таким чином, для передачі даних на них точки доступу повинні використовувати тільки різні ресурси каналу (частоту або час) [13]. Механізм такого узгодженого графіка передачі ще розробляється. Зокрема, поки не ясно, чи дозволить стандарт технології Wi-Fi 7 координувати свої дії точкам доступу, що належать різним операторам. Відсутність такої функції не є суттєвим обмеженням, оскільки в багатьох сценаріях мережею керує один оператор.

Природно, централізований контролер може володіти детальною інформацією про взаємні завади в мережі. Тому, якщо завади між сусідніми точками доступу (включаючи пов'язані з ними станції) сильні, він може призначити цим точкам доступ до різних ресурсів каналу, щоб усунути завади. Якщо завади слабкі, ті ж ресурси повинні бути призначені для підвищення ефективності використання радіоресурсів.

На практиці проблема планування радіоресурсу в таких сценаріях ускладнюється багатьма факторами. Перш за все, зв'язок між точками доступу та пультом дистанційного керування не є миттєвим. По-друге, потрібен деякий час, щоб точка доступу не дозволила підключеним станціям отримати доступ до каналу протягом інтервалів часу, відведених лише для іншої точки доступу. Ці

проблеми також можна вирішити, розставивши пріоритети періодичних послідовностей часових інтервалів.

1.3.4 Схеми передачі даних

Розглянемо, як пристрої можуть передавати пакети в зарезервованих слотах.

Перш за все, зауважимо, що передача пакетів вимагає підтвердження. У найпростішому випадку підтвердженням є кадр АСК, який відправляється одержувачем пакета даних через інтервал SIFS.

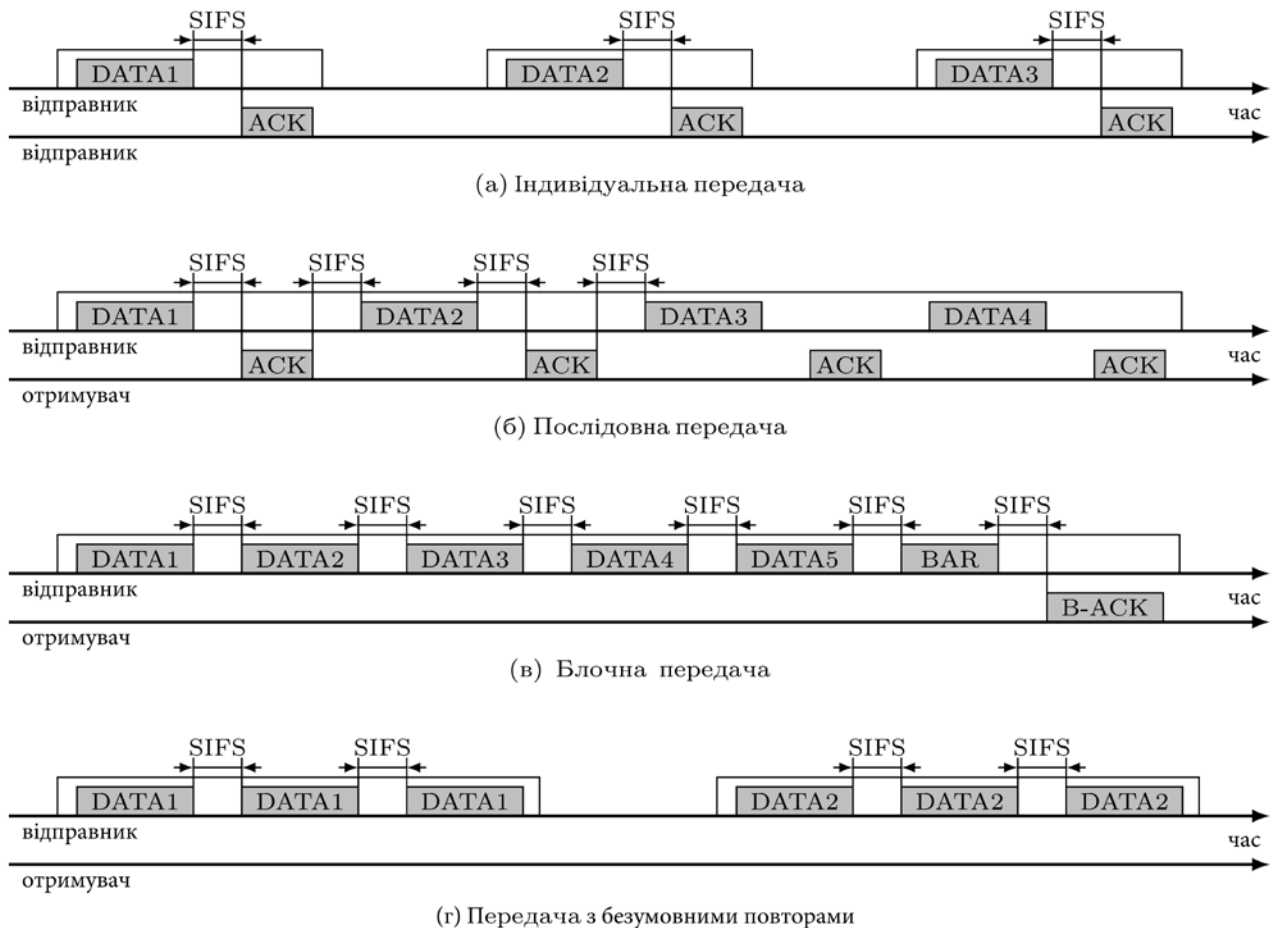


Рисунок 1.6 – Методи передачі даних С

Відправник повторно передає недоставлені пакети, доки вони не будуть доставлені або скинуті. Відповідно до стандарту, пристрій скидає пакет при

досягненні лічильником повторних спроб пакетів певного порогу або при досягненні максимальної межі затримки пакетів, що позначається в дисертації як термін служби пакета. Оскільки важливо забезпечити низький рівень втрати пакетів і доставити пакети протягом заданого часу, доцільно встановити це порогове число повторних спроб передачі досить високим (так що поріг фактично не досягається протягом терміну служби пакета).

При індивідуальних передачах відправник робить тільки одну спробу передати пакет в рамках зарезервованого інтервалу часу (рис. 1.6 (а)). Коли адресат отримує пакет, він відповідає через інтервал SIF S коротким кадром АСК у тому ж зарезервованому інтервалі. Використання кадрів підтвердження необхідне, оскільки, навіть у разі детермінованого доступу, бездротовий канал є ненадійним. Якщо відправник отримує АСК, він припускає, що пакет доставлено. В іншому випадку він повторно передає пакет у наступному зарезервованому інтервалі часу.

Якщо зарезервований інтервал досить довгий, відправник може зробити кілька спроб передачі (один або кілька пакетів) у цьому інтервалі за допомогою ТХОР, з кадром підтвердження після кожного кадру даних або в кінці інтервалу, як показано нижче. При послідовній передачі відправник чекає АСК після кожної спроби пакета (рис. 1.6 (б)). Тільки після того, як поточний пакет буде доставлений, відправник може перейти до передачі наступного пакета. Іншими словами, якщо підтвердження АСК отримано, відправник намагається передати наступний пакет. Якщо АСК не отримано, відправник повторно передає поточний пакет. При цьому наступні спроби відбуваються в поточному зарезервованому інтервалі, якщо його довжина достатня. В іншому випадку переказ відкладається до наступного зарезервованого інтервалу.

Недоліком послідовної передачі є те, що накладні витрати, викликані передачею рамок АСК, занадто високі. Хоча кадри АСК містять мало корисної інформації, вони займають багато часу в каналі через незменшувану тривалість заголовків фізичного рівня, міжкадрові інтервали та досить низьку швидкість передачі даних конструкцій сигнал-код, що використовуються для передачі

кадрів АСК. Виключення кадрів АСК завдяки процедурі передачі даних і, таким чином, зменшенню накладних витрат, IEEE 802.11e вводить підтвердження блоку (BlockAck). Він дозволяє надсилати кілька пакетів поспіль, а потім підтверджувати їх усі одночасно за допомогою кадру BlockAck, який містить бітову маску, що вказує на отримані пакети.

У роботі розглянуто один із способів використання BlockACK разом із механізмами резервування ресурсів каналу. Для стислості назвемо це блоковою передачею (рис.1.6 (в)). У режимі передачі блоків відправник передає кілька пакетів поспіль. Потім він передає короткий запит на підтвердження блоку, запит BlockAck, на який одержувач відповідає кадром BlockACK, що містить растрове зображення, що вказує на доставлені пакети. Недоставлені пакети передаються повторно протягом наступного зарезервованого інтервалу часу (разом з кількома новими пакетами, якщо довжина зарезервованого інтервалу достатня).

Додавання стандарту IEEE 802.11aa зробило можливим ще один спосіб передачі: з безумовними повторами. Цей режим усуває необхідність надсилати кадри підтвердження, що зменшує накладні витрати. Однак для того, щоб досягти потрібної ймовірності доставки пакета, відправник робить кілька послідовних спроб передачі кожного пакета (рис. 1.6 (г)).

Додаток IEEE 802.11n збільшує номінальну швидкість передачі даних і дозволяє агрегацію пакетів, що може використовуватися в поєднанні з періодичним резервуванням. У цьому випадку передача A-MPDU аналогічна блоковій передачі, де інтервал між двома кадрами даних дорівнює нулю, а довжина другого та наступних кадрів не включає заголовок фізичного рівня. У той же час передача A-MSDU Може бути представлена як індивідуальна, так і послідовна передача в залежності від тривалості кадрів і зарезервованих часових проміжків.

Велика палітра схем передачі даних, доступних в сучасних мережах Wi-Fi, а також різноманіття вимог QoS піднімає проблему вибору схеми передачі даних і параметрів резервування для задоволення вимог QoS конкретного потоку з мінімальним споживанням пропускну здатності.

Ця проблема ускладнюється наступним аспектом. Хоча резервування посилення зменшує ймовірність зіткнення з сусідніми пристроями або прихованими терміналами, вони не гарантують, що пакет, відправлений у резервуванні, буде доставлений. Посилка може бути втрачена з кількох причин.

У роботі всі подібні причини недоставки посилок узагальнюються поняттям випадкового шуму. Через випадковий шум можуть знадобитися додаткові спроби передачі. Це означає, що пристрої Wi-Fi повинні резервувати більше ресурсів каналу, беручи до уваги як початкову передачу пакетів, так і повторну спробу, хоча вони не знають точної кількості необхідних повторних спроб. Крім того, існуючі програми зазвичай генерують змінні потоки даних, які вимагають від пристроїв резервування додаткових ресурсів каналу на випадок збільшення швидкості потоку.

Всі ці особливості ускладнюють підбір параметрів резервування, що відповідають вимогам до якості обслуговування заданого потоку при мінімальних витратах каналних ресурсів. І цей вибір безпосередньо впливає на продуктивність мережі, оскільки занадто великий зарезервований час з'єднання зменшує кількість одночасних потоків даних у мережі, зменшуючи загальну пропускну здатність мережі. У той же час занадто мала зарезервована потужність може призвести до порушення вимог QoS.

Оскільки алгоритми планування передачі можуть бути обчислювально складними, [15] пропонує виконувати деякі обчислення в автономному режимі. Зокрема, при прийнятті рішення про допуск нового потоку в систему виконуються складні алгоритми планування в автономному режимі на основі часу життя пакетів в конкретному потоці. В онлайн-режимі виконуються обчислювально «легкі» завдання, пов'язані з читанням та його реалізація.

Найпростіший спосіб обліку пакетних помилок описаний в додатку N стандарту Wi-Fi. Він пропонує резервувати час для додаткових спроб передачі, виходячи з припущення, що помилки передачі виникають незалежно. Зокрема, якщо частка невдалих спроб передачі пакетів становить q , стандарт пропонує

резервувати в $\frac{1}{1-q}$ раз більше ресурсів каналу, ніж необхідно, якщо всі спроби передачі були успішними. Очевидно, і стандарт наголошує на цьому, такої кількості ресурсів достатньо, щоб гарантувати майже нульову частку втрачених пакетів, якщо час життя кожного пакета нескінченний. Однак цього обсягу може бути недостатньо для задоволення вимог QoS для чутливого до затримки трафіку, такого як аудіо- та відеопотоки в реальному часі.

1.3.5 OFDMA на Wi-Fi

Основні принципи роботи OFDMA в Wi-Fi

Одним із ключових нововведень у надбудові IEEE 802.11 ах є OFDMA. Важливою перевагою OFDMA є те, що для передачі даних може бути використана група піднесучих, які в даний час найменш схильні до частотно-селективних перешкод для даного користувача. У той же час, у порівнянні з попередніми доповненнями, такими як IEEE 802.11 ас, в IEEE 802.11ах, у 4 рази збільшено щільність піднесучої та тривалість символу OFDM.

У надбудові IEEE 802.11ах ресурси каналів розділені за часом і частотою, але для спрощення управління ресурсами та роботи пристроїв, а також для підтримки сумісності з пристроями попереднього покоління передача OFDMA організована покадрово. Це означає, що кадр може передавати інформацію від або до кількох станцій. У такій рамці групи піднесучих можуть бути призначені різним станціям, але тривалість всіх передач в одному кадрі той же.

Група допоміжних носіїв у додатку до осі IEEE 802.11 називається одиницею ресурсів (RU) і може містити 26, 52, 106, 242, 484, 996 або 2x 996

піднесучих (включаючи перевізників обслуговування).

Таблиця 1.3. Максимальна кількість блоків ресурсів у каналі заданої ширини.

Кількість субнесіїв у блоці ресурсів	20 МГц	40 МГц	80 МГц	160 МГц
26	9	18	37	74
52	4+1	8+2	16+5	32+10
106	2+1	4+2	8+5	16+10
242	1	2	4+1	8+2
484	—	1	2+1	4+2
996	—	—	1	2

Позначення "+n" означає, що крім зазначених блоків ресурсів, існує n блоків ресурсів з 26 піднесучими.

Весь діапазон 20 МГц, діапазон 40 МГц, діапазон 80 МГц і 15 діапазон 160 МГц відповідають ресурсним блокам з 242, 484, 996 піднесучими і два ресурсних блоки з 996 субнесучими, з відповідальними. Кожен широкий блок ресурсів може бути розділений на два приблизно вдвічі вужчих ресурсних блоків. У свою чергу, Кожен з них може бути розділений знову, незалежно один від одного. Виняток становить лише те, що при поділі ресурсного блоку на 242 або 996 піднесучих з'являється додатковий ресурсний блок з 26 піднесучими.

Максимальне число блоків ресурсів для кожної смуги пропускної здатності наведено в таблиці 1.3.

Обсяг даних, які можуть бути передані в кожному блоці ресурсів, залежить від його розміру і використовуваної сигнально-кодової конструкції, як показано в таблиці 1.4. У випадку з MIMO номінальна швидкість передачі даних множитья на кількість встановлених просторових потоків. Хоча MU-MIMO та OFDMA можна використовувати разом, MIMO можна використовувати лише в блоках ресурсів зі 106 піднесучими або ширше. Зазначимо, що стандарт забороняє використовувати маніпуляції 1024-QAM у невеликих блоках ресурсів.

Однак, на відміну від точки доступу, станції OFDMA можуть передавати дані з більшою сумарною потужністю.

1.3.6 Організація передачі даних за допомогою OFDMA

Давайте розглянемо, як організовані передачі OFDMA від точки доступу до станцій і навпаки. У разі передачі з точки доступу, заголовок фізичного шару кадру вказує на те, як саме розділений кадр за частотою, для яких станцій призначений кожен блок ресурсів, з якою структурою сигналу і коду він передається, а також інші параметри передачі.

Виконати багатокористувацьку передачу даних зі станцій на точку доступу складніше. Багатокористувацька передача виконується синхронно кількома станціями, а точка доступу діє як координатор і визначає, коли почнеться передача. По-перше, він повинен отримувати інформацію про наявні на станціях дані для передачі, а по-друге, призначати блоки ресурсів для передачі тим станціям, які мають дані. Також варто зазначити, що AP не знає, чи буде канал вільним з точки зору станції на момент запланованої передачі. Крім того, важко підтримувати сувору синхронізацію часу через зсув годинника.

Час від часу станції можуть інформувати точку доступу про те, що у них є дані для передачі, надсилаючи спеціальні звіти. Такі звіти можуть мати різний ступінь деталізації і можуть бути відправлені з попереднім запитом точки доступу або без нього. З урахуванням отриманої інформації точка доступу визначає тривалість передачі у висхідному каналі, розподіляє ресурсні блоки між станціями, вибирає сигнально-кодову конструкцію та інші параметри передачі. Потім точка доступу передає цю інформацію станціям за допомогою тригерних рамок.

Для цілей синхронізації багатокористувацька передача виконується через інтервал SIF S після тригерної рамки. У той же час, оскільки для підготовки передачі станціям може знадобитися більше часу, ніж SIF S, точка доступу може штучно подовжувати рамку спускового гачка.

Як згадувалося вище, окремі передачі, з яких складається багатокористувацька шпередача, повинні починатися і закінчуватися одночасно з іншими. Якщо тривалість багатокористувацької передачі досить велика, станція може передавати кілька пакетів, виконуючи агрегацію. Якщо тривалість передачі чергового пакета виходить за рамки багаточільової передачі, то пакет не запускається (іншими словами, невикористана частина часу витрачається даремно), або пакет фрагментується і його частина відправляється.

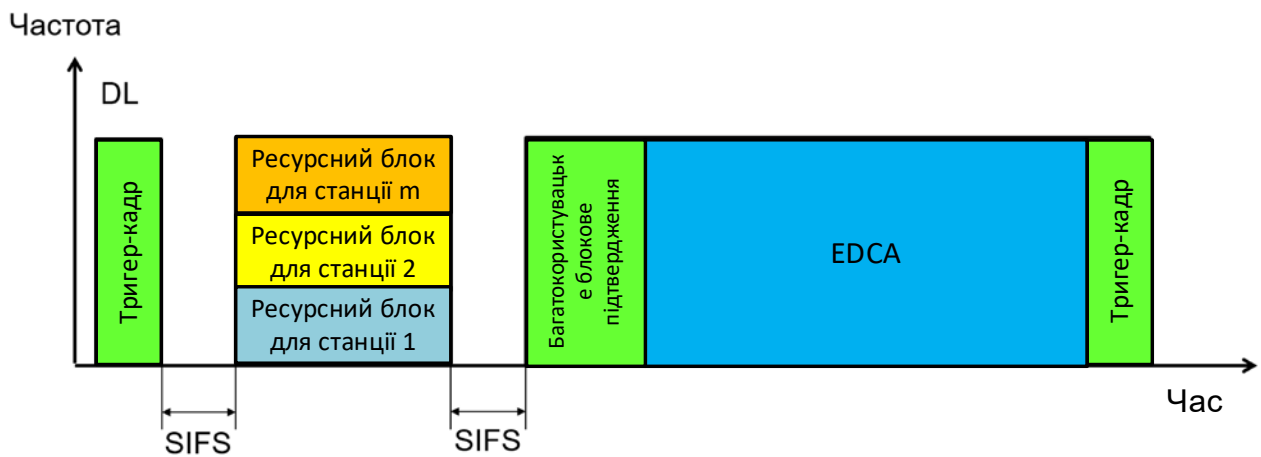


Рисунок 1.7 – Приклад передачі даних без використання RTS/CTS

У разі передачі коротких пакетів використання технології OFDMA може значно зменшити накладні витрати, пов'язані з часом, випадковим відстроченням, міжкадровими інтервалами, а також передачею преамбул і заголовків фізичного рівня. Зокрема, IEEE 802.11ax дозволяє станціям передавати короткі кадри підтвердження багатокористувацькою передачею відразу після отримання багатокористувацької передачі з точки доступу. У цьому випадку за допомогою даних точка доступу передає інформацію, необхідну для виконання багатокористувацької передачі даних до точки доступу без тригерної рамки. При використанні IEEE 802.11ax передбачається, що передачі від точки доступу та до неї чергуються. У цьому випадку кожна наступна багатокористувацька передача в низхідній лінії може бути адресована новій підмножині станцій.

Щоб зменшити накладні витрати, пов'язані з потребою в точці доступу для

підтвердження отримання багатокористувацької передачі від станцій, було розширено формат кадру підтвердження блоку. Його можна використовувати для перевірки даних з декількох станцій одночасно в IEEE 802.11ax. Нове доповнення також підвищує ефективність деяких раніше розроблених механізмів. Наприклад, для захисту багатокористувацьких передач від впливу прихованих станцій створено багатокористувацький механізм RTS/CTS, див. 1.8. При цьому кадри CTS залишаються в старому форматі, що забезпечує зворотню сумісність. Для цього кадр CTS дублюється в кожному підканалі 20 МГц. Набір двадцятимегагерцових підканалів, які повинна використовувати конкретна станція для передачі CTS, визначається в розрахованому на багато користувачів RTS і повинен включати блок ресурсів, який буде використовуватися для подальшої передачі станцією. Це робиться для того, щоб встановити віртуальний лічильник зайнятості NAV на всіх сусідніх станціях (можливо, попереднього покоління), які приймають цей CTS, і таким чином захистити передачу від зіткнень. Можливо, що кілька станцій будуть передавати кадр CTS одночасно по одному каналу (якщо їх блоки ресурсів знаходяться в цьому каналі), але ці кадри CTS є кадрами CTS робляться абсолютно ідентичними за сигналами, тому їх зіткнень не відбувається. Отримавши кілька однакових CTS на одному каналі, АП не може отримати інформацію про те, які станції відправили CTS. Таке обмеження може призвести до того, що точка доступу або не буде планувати паралельні передачі, зайняті піднесучими з одного і того ж каналу 20 МГц, або ігнорувати той факт, що деякі приймачі, можливо, не відправили CTS.

На закінчення зазначимо, як станція визначає потужність передачі OFDMA.

Перш за все, АП вказує в рамці тригера свою потужність передачі PWR_{AP} , нормалізовану до смуги пропускання 20 МГц, і бажану потужність прийнятого сигналу $RSSI_{Target, UL}$. Кожна станція обчислює свою потужність передачі PWR_{STA} як:

$$PWR_{STA} = RSSI_{Target, UL} + PWR_{AP} - RSSI_{DL}, \quad (1.1)$$

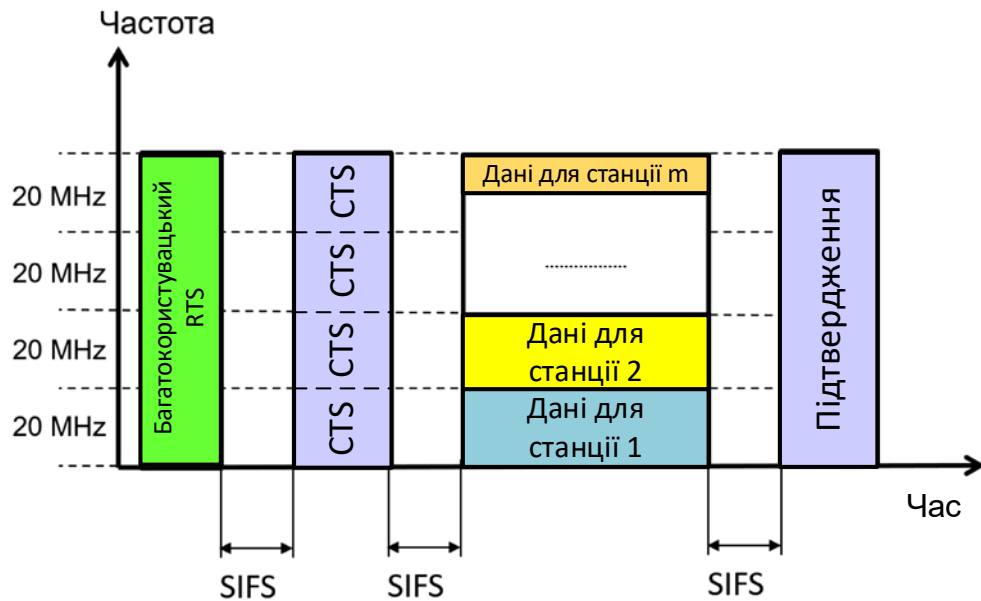


Рисунок 1.8 – Приклад передачі даних за допомогою багатокористувачького RTS/CTS

де $RSSI_{DL}$ - виміряна прийнята потужність тригера кадру, нормалізована до смуги пропускання 20 МГц.

Незважаючи на те, що робота над стандартом IEEE 802.11ax, який визначив можливості OFDMA в Wi-Fi, була завершена тільки в кінці 2020 року, деякі його особливості вже добре вивчені в літературі.

Оскільки алгоритми планування радіоресурсів для мереж IEEE 802.11ax вивчаються лише в невеликій кількості робіт, цікаво проаналізувати рішення аналогічних завдань в мережах LTE, в яких також використовується OFDMA. У роботі розглядаються алгоритми планування радіоресурсів в мережах LTE, які враховують особливості даної технології.

Однак у технології IEEE 802.11ax обмеження на можливі розташування та розміри блоків ресурсів є ще складнішими. Наприклад, не можна виділити радіоресурси клієнтському пристрою, отриманому шляхом «склеювання» трьох сусідніх блоків ресурсів з 26 піднесучими, тоді як в LTE можна виділити кілька суміжних блоків ресурсів на один клієнтський пристрій.

Таким чином, на момент проведення дослідження актуальним було завдання розробки та оцінки ефективності алгоритму планування радіоресурсу

для мереж IEEE 802.11ax, який би забезпечував збільшення пропускної здатності та зменшення часу доставки даних від клієнтських станцій до точки доступу.

Крім того, для зворотної сумісності в мережах осі IEEE 802.11 OFDMA працює поверх CSMA/CA, що означає, що передача даних OFDMA можлива лише після того, як точка доступу виграє суперечку за канал зв'язку за допомогою EDCA. Для мереж Wi-Fi типова ситуація, коли в одній мережі працюють станції різних поколінь. У такій неоднорідній мережі застарілі станції можуть передавати дані лише після того, як вони виграли конкурс каналів, тоді як нові станції Wi-Fi може передавати дані як після самостійного доступу до каналу через конкуренцію, так і при отриманні блоків ресурсів з точки доступу, що може призвести до недоброчесного розподілу ресурсів каналу. Тому цікаво вивчити, як наявність станцій різних поколінь в гетерогенній мережі Wi-Fi з точкою доступу IEEE 802.11ax впливає на ефективність використання ресурсів каналу і справедливість їх розподілу. Крім того, необхідно розробити та дослідити модифікацію правил доступу до каналів, спрямовану на забезпечення ефективного та справедливого розподілу ресурсів каналу. Іншими словами, модифікація повинна гарантувати, що станції IEEE 802.11ax переважно використовують OFDMA для передачі даних, а застарілі станції звертаються до каналу так часто, як якщо б не було передач OFDMA. Таким чином, задача дослідження проблеми несправедливого розподілу радіоресурсів в гетерогенній мережі IEEE 802.11ax є актуальною а також змінення правил доступу до каналів для вирішення цієї проблеми.

Висновки до розділу

Аналіз нових методів передачі даних, які були або в даний час впроваджуються в технології Wi-Fi в рамках недавніх доповнень до стандарту IEEE 802.11, показує, що ці методи призначені для підвищення ефективності мереж Wi-Fi у всіх трьох основних сценаріях використання (потокове передавання, міжмашинний зв'язок, додатки в реальному часі), з єдиним

обмеженням - низька швидкість руху клієнтських пристроїв відносно точок доступу.

При цьому сам стандарт IEEE 802.11 і його доповнення носять концептуальний характер: описують формати кадрів, сигнально-кодові конструкції, нові методи множинного доступу, але не уточнюють, як їх використовувати і з якими параметрами.

Тому великий практичний і науковий інтерес представляє вивчення методів множинного доступу сучасних мереж Wi-Fi і підвищення ефективності їх роботи. Слід зазначити, що новизна рішень, зазначених в останніх доповненнях, часто не дозволяє використовувати існуючі моделі і алгоритми, розроблені для попередніх доповнень стандарту Wi-Fi.

Зокрема, з урахуванням аналізу сучасного стану досліджень, у цьому розділі сформульовано такі завдання, які вирішуються у роботі.

Удосконалення узагальненого методу математичного моделювання обслуговування мультимедійних потоків за допомогою періодичного резервування каналів з метою вибору параметрів резервування та схем передачі даних, що дозволяють мінімізувати кількість споживаних ресурсів каналу при дотриманні вимог до якості обслуговування.

2. ТЕХНОЛОГІЯ ETHERNET

2.1 Специфікації IEEE для локальних мереж

У 1980 році IEEE заснував «Комітет 802 зі стандартизації локальних мереж», результатом якого стало прийняття сімейства стандартів IEEE 802.x, які містять рекомендації щодо проектування нижчих рівнів локальних мереж.

Сімейство стандартів IEEE 802.x охоплює лише два нижні рівні з семи рівнів моделі OSI – фізичний і канальний. Це пов'язано з тим, що саме ці шари найбільш точно відображають специфіку локальних мереж.

Специфіка локальних мереж виражається і в поділі канального шару на два підшари:

- підрівень керування доступом до середовища Media Access Control (MAC)
- підрівень логічної передачі даних (Logical Link Control, LLC).

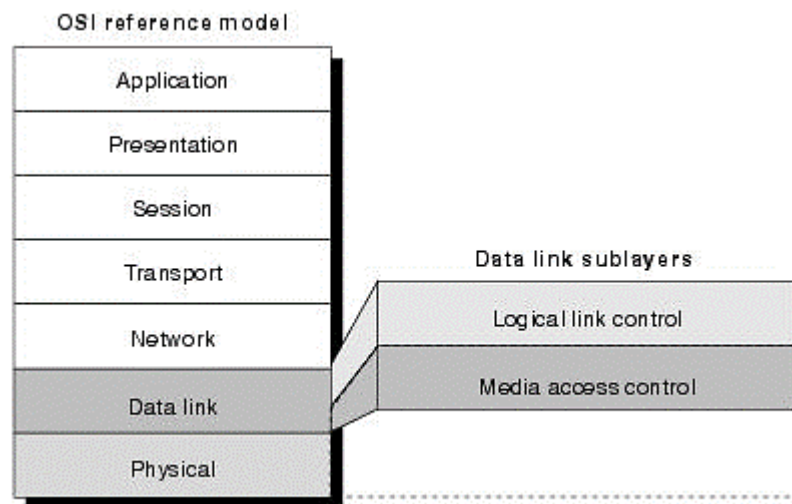


Рисунок 2.1 – Модель OSI

Шар з'явився завдяки існуванню загального середовища передачі даних в локальних мережах. Саме цей шар забезпечує правильне спільне використання загального середовища, надаючи його в розпорядження тієї чи іншої станції в

мережі відповідно до певного алгоритму. Після того, як середовище було отримано, воно може бути використане наступним підшаром, який організовує надійну передачу логічних одиниць даних - кадрів інформації.

Рівень LLC відповідає за авторитетну передачу кадрів даних між вузлами, а також реалізує функції інтерфейсу з суміжним мережевим рівнем. Для рівня LLC також існує кілька варіантів протоколів, які відрізняються наявністю або відсутністю процедур відновлення кадрів в разі втрати або спотворення на цьому рівні, тобто відрізняються якістю транспортних послуг на цьому рівні. [1]

Протоколи рівнів MAC і LLC є взаємно незалежними - кожен протокол MAC-рівня може використовуватися з будь-яким типом протоколу рівня LLC і навпаки.

Стандарт IEEE 802 містить кілька розділів:

- Розділ 802.1 містить основні поняття та визначення, загальні характеристики та вимоги до локальних мереж.

- Розділ 802.2 визначає підрівень управління логічними каналами LCC;

- Розділ 802.x регулюють специфікації різних протоколів підрівня доступу MAC та їх зв'язок з рівнем LLC, зокрема, як обговорювалося в цій роботі:

- стандарт 802.3 - локальна мережа на основі Ethernet описує множинний доступ Carrier Sense з виявленням конфліктів (CSMA/CD);

- стандарт 802.11 – бездротові мережі, визначає множинний доступ Carrier sense із запобіганням конфліктів (CSMA/CA).

Для кожного з цих стандартів існують специфікації фізичного рівня, які визначають середовище передачі даних (коаксіальний кабель, кручена пара, оптоволоконний кабель або радіоефір), його параметри, а також методи кодування інформації для передачі по цьому середовищу.

У всіх методах доступу використовуються протоколи площини управління логічним каналом LLC, описані в стандарті 802.2.

Рівень управління логічними каналами LLC надає верхнім рівням три типи процедур:

- LLC 1 - послуга без встановлення з'єднання і без підтвердження;
- LLC 2 - послуга з встановленням та підтвердженням з'єднання;
- LLC 3 – це послуга без встановлення з'єднання, але з підтвердженням.

Цей набір процедур є загальним для всіх методів доступу до середовища, визначених стандартами 802. сx.

Сервіс без підключення та без підтвердження LLC1 надає користувачеві засоби для передачі даних економічно ефективним способом. Як правило, цей тип послуг використовується, коли такі функції, як відновлення помилок і впорядкування даних, виконуються протоколами вищого рівня, тому немає необхідності дублювати їх на рівні LLC.

Служба підтвердження з'єднання LLC2 надає користувачеві можливість встановити логічне з'єднання перед передачею будь-якого блоку даних і, якщо потрібно, виконати процедури відновлення помилок і послідовність потоку цих блоків у межах встановленого з'єднання.

Послуга без встановлення з'єднання з підтвердженням LLC3 використовується в тих випадках, коли накладні витрати на встановлення логічного з'єднання перед відправкою даних неприпустимі, і потрібне підтвердження правильності отриманих даних.

За своїм призначенням всі кадри рівня LLC поділяється на три типи:

- *Інформаційні кадри* призначені для передачі інформації в процедурах логічного зв'язку і обов'язково повинні містити інформаційне поле. У процесі передачі інформаційних блоків вони нумеруються в режимі висувного вікна;
- *Керуючі кадри* призначені для передачі команд і відповідей в логічно пов'язаних процедурах, включаючи запити на повторну передачу спотворених інформаційних блоків.
- *Ненумеровані кадри* призначені для передачі ненумерованих команд і відповідей, які виконують зв'язок, ідентифікацію та тестування на рівні LLC у процедурах без підключення, а також логічне з'єднання та повідомлення про помилки в процедурах на основі логічних з'єднань.

Всі типи персоналу рівня LLC мають єдиний формат:

Прапор 01111110	DSAP	SSAP	Control	Дані	Прапор 01111110
--------------------	------	------	---------	------	--------------------

Рисунок 2.2 – Формат рамки рівня LLC

Кадр LLC обрамляється двома однобайтними полями «Прапор», які мають значення 01111110. Прапорці використовуються на рівні MAC для визначення меж блоків.

Поле кадрових даних LLC призначене для передачі пакетів протоколів верхнього рівня, таких як IP, по мережі. Поле даних може бути відсутнім у кадрах керування та деяких нумерованих кадрах.

Конт рольне поле (займає один байт) використовується для позначення того, чи є кадр даних інформаційним, контрольованим або нумерованим. Крім того, це поле містить порядкові номери надісланих і успішно отриманих кадрів, якщо підрівень LLC використовує процедуру LLC2 на основі підключення.

Поля адреси DSAP і SSAP (адреса т очки входу служ би призначення т а адреса т очки входу вихідної служ би) мають розмір 1 байт. Вони дозволяють вказати, який сервіс верхнього рівня пересилає дані за допомогою цього кадру. Хост-програмне забезпечення має розпізнати, який протокол приєднав свій пакет до поля даних отриманого кадру під час отримання кадрів канального рівня, щоб для передачі пакета, витягнутого з кадру, в потрібний протокол для подальшої обробки. Для ідентифікації цих протоколів вводяться так звані адреси точок доступу SAP Service. Значення адрес SAP присвоюються протоколам відповідно до стандарту 802.2.

За допомогою керуючих фреймів протокол LLC має можливість регулювати потік даних, що надходять від вузлів мережі.

2.2 Локальні мережі Ethernet

Ethernet – це мережевий стандарт, заснований на експериментальній

мережі Ethernet, яку компанія Xerox розробила та впровадила в 1975 році. Метод доступу був випробуваний у другій половині 1960-х років у радіомережі Гавайського університету, яка використовувала різні варіанти довільного доступу до загального радіосередовища, що отримала загальну назву Aloha.

Сьогодні Ethernet є найбільш широко використовуваним стандартом локальної мережі. Загальна кількість діючих в даний час мереж Ethernet оцінюється в кілька мільйонів, а число комп'ютерів з установленими мережевими адаптерами Ethernet обчислюється десятками мільйонів.

Залежно від типу фізичного середовища стандарт IEEE 802.3 має різні модифікації: 10 Base-5, 10 Base-2, 10 Base-T, 10Base-FL, 10Base-FB.

У 1995 році був прийнятий стандарт Fast Ethernet, опис якого є просто додатковим розділом до основного стандарту 802.3, розділу 802.3u. Офіційно стандарт 802.3u встановив три різні специфікації для фізичного рівня Fast Ethernet і дав їм такі назви: 100Base-TX, 100Base-T 4, 100Base-FX.

Аналогічним чином, стандарт Gigabit Ethernet 1998 року описаний в розділі 802.3z основного документа і має наступні технічні характеристики: 1000 BASE-T і 1000BASE-X.

Всі види стандартів Ethernet (включаючи Fast Ethernet і Gigabit Ethernet) використовують один і той же метод розділення носіїв - метод CSMA/CD. [2]

2.2.1 10Base-5

Стандарт 10 Base-5 в основному відповідає експериментальній мережі Ethernet компанії Xerox і може вважатися класичним Ethernet. В якості середовища передачі даних використовується коаксіальний кабель з хвильовим опором 50 Ом, діаметром центрального мідного дроту 2,17 мм і зовнішнім діаметром близько 10 мм («товстий» коаксіальний).

Кабель використовується як моноканал для всіх станцій. Відрізок кабелю має максимальну довжину 500 м (без повторювачів) і повинен мати на кінцях термінатори 50 Ом, які поглинають сигнали, що поширюються по кабелю, і

запобігають виникненню відбитих сигналів. Станція повинна бути підключена до кабелю за допомогою приймача-передавача. Трансивер монтується безпосередньо на кабель і живиться від мережевого адаптера комп'ютера. Трансивер з'єднується з мережевим адаптером інтерфейсним кабелем AUI (Attach-nent Unit Interface) довжиною до 50 м, що складається з 4 кручених пар.

Стандарт 10Base-5 визначає можливість використання в мережі спеціального пристрою - ретранслятора. Ретранслятор використовується для з'єднання декількох відрізків кабелю в одну мережу і тим самим збільшення загальної довжини мережі.

Правило використання повторювачів в мережі Ethernet 10 Base-5 називається «правило 5-4-3»: 5 сегментів, 4 повторювача, 3 навантажених сегмента, тобто сегменти, до яких підключаються кінцеві вузли. При максимальній довжині відрізка кабелю 500 м це дає максимальну довжину мережі 10 Base-5 2500 метрів.

До переваг стандарту 10Base-5 можна віднести:

- хороший захист кабелю від зовнішніх впливів;
- порівняно велика відстань між вузлами;
- Можливість легко переміщати робочу станцію в межах довжини кабелю AUI.

Недоліками 10Base-5 є:

- висока вартість кабелю;
- складність його укладання через велику жорсткість;
- необхідність спеціального інструменту для окінцювання кабелю;
- Відключення всієї мережі при пошкодженні кабелю або поганому з'єднанні.

· Необхідно заздалегідь передбачити підключення кабелів до всіх можливих місць, де встановлені комп'ютери.

2.2.2 10Base-2

У стандарті 10 Base-2 в якості середовища передачі використовується коаксіальний кабель з діаметром центрального мідного дроту 0,89 мм і зовнішнім діаметром близько 5 мм («тонкий» коаксіальний). Кабель має хвильовий опір 50 Ом.

Максимальна довжина відрізка без повторювачів - 185 м, на кінцях відрізків повинен мати термінатори опором 50 Ом. Станції підключаються до кабелю за допомогою високочастотного T-роз'єму BNC, що представляє собою трійник з одним краном, що підключається до мережевого адаптера, а два інших - до двох кінців розриву кабелю.

Стандарт 10 Base-2 також передбачає використання повторювачів, кількість яких також не повинна перевищувати 4 штук. При цьому сітка буде мати максимальну довжину $5 \times 185 = 925$ метрів.

Приймачі-передавачі інтегровані з мережними адаптерами, тому більш гнучкий тонкий коаксіальний кабель можна прокласти безпосередньо до вихідного роз'єму плати мережного адаптера, встановленої в системному блоці комп'ютера.

Загальним недоліком стандартів 10 Base-5 і 10Base-2 є відсутність інформації в режимі реального часу про стан моноканальності. Пошкодження кабелю виявляється відразу (мережа перестає працювати), але для пошуку довжини кабелю, що вийшла з ладу, потрібен спеціальний прилад - кабельний тестер.

2.2.3 10Base-T

10 мереж Base-T використовують дві неекрановані кручені пари (UTP) як середовище. Одна кручена пара потрібна для передачі даних зі станції на ретранслятор (вихід Tx мережевого адаптера), а інша - для передачі даних з

ретранслятора на станцію (Rx-вхід мережевого адаптера).

Багатопортові ретранслятори, що використовують технологію 10Base-T, прийнято називати концентраторами або концентраторами. Хаб виконує роль ретранслятора сигналу на всіх сегментах крученої пари, підключених до його портів, завдяки чому формується єдине середовище передачі даних – логічний моноканал (логічна загальна шина).

Стандарт визначає бітрейт 10 Мбіт/с і максимальну відстань не більше 100 м між двома безпосередньо пов'язаними вузлами (станціями та концентраторами) за наявності якості крученої пари не нижче 3 категорії.

10 хабів Base-T можна з'єднати між собою за допомогою тих самих портів, які використовуються для підключення кінцевих вузлів. Необхідно подбати про те, щоб передавач і приймач одного порту були підключені до приймача і передавача іншого порту відповідно.

З метою забезпечення синхронізації станцій при реалізації процедур доступу CSMA/CD та надійного виявлення колізій станціями, стандарт визначає максимальну кількість хабів між будь-якими двома станціями в мережі, а саме 4. Це правило називається «правило 4-хабів» і замінює «правило 5-4-3», яке застосовується до коаксіальних мереж. При створенні мережі 10Base-T з великою кількістю станцій хаби можуть бути з'єднані між собою в ієрархічному порядку, утворюючи деревоподібну структуру.

Загальна кількість станцій в мережі 10Base-T не повинна перевищувати сумарний ліміт в 1024. Під максимальною довжиною мережі 2500 м тут розуміють максимальну відстань між будь-якими двома кінцевими вузлами мережі - «максимальний діаметр мережі». Очевидно, що якщо між будь-якими двома вузлами мережі має бути не більше 4 повторювачів, то максимальний діаметр мережі 10Base-T становить $5 \times 100 = 500$ метрів.

Мережі 10Base-T мають багато переваг перед коаксіальними варіантами Ethernet. Ці переваги обумовлені поділом загального фізичного кабелю на окремі відрізки кабелю, під'єднані до центрального комунікаційного пристрою (хаба). Логічно, що ці сегменти все ще утворюють спільне середовище, але їх фізичне

розділення дозволяє контролювати їх стан і відключати в разі обриву, короткого замикання або несправності мережевого адаптера. Це значно спрощує роботу великих мереж Ethernet, оскільки хаб зазвичай автоматично виконує ці функції, сповіщаючи адміністратора мережі про проблему.

Стандарт 10Base-T визначає процедуру перевірки фізичних характеристик двох сегментів витвої пари, що з'єднують трансивер кінцевого вузла і порт ретранслятора. Наявність активного пристрою між кінцевими вузлами, здатного контролювати роботу вузлів і ізолювати несправні від мережі - головна перевага технології 10 Base-T в порівнянні зі складними коаксіальними мережами.

2.2.4 FOIRL

Стандарт FOIRL (Fiber Optic Inter-Repeater Link) є першим стандартом 802.3 для використання оптоволокна в мережах Ethernet. Він гарантує довжину волоконно-оптичного зв'язку між ретрансляторами до 1 км при загальній довжині мережі не більше 2500 м. Максимальна кількість ретрансляторів між будь-якими вузлами мережі - 4. Тут можна досягти максимального діаметра 2500 м, хоча максимальний Довжина кабелю між усіма 4 ретрансляторами, а також між ретрансляторами і кінцевими вузлами не допускається - в іншому випадку ви отримаєте мережу довжиною 5000 метрів.

2.2.5 10Base-FL

Стандарт 10 Base-FL є незначним покращенням стандарту FOIRL. Потужність передавачів збільшена, тому максимальна відстань між вузлом і хабом зросла до 2000 м. Максимальна кількість ретрансляторів між вузлами залишається на рівні 4, а максимальна довжина мережі становить 2500 метрів.

2.2.6 10Base-FB

Стандарт 10 Base-FB призначений тільки для підключення ретрансляторів. Кінцеві вузли не можуть використовувати цей стандарт для приєднання до портів хаба. Між вузлами мережі можна встановити до 5 10 ретрансляторів Base-FB з максимальною довжиною 2000 м на сегмент і максимальною довжиною мережі 2740 метрів.

При відсутності кадрів для передачі 10 ретрансляторів Base-FB безперервно обмінюються спеціальними послідовностями сигналів, що відрізняються від кадрів даних для підтримки синхронізації.

Як і у випадку зі стандартом 10 Base-T, стандарти волоконно-оптичного Ethernet дозволяють з'єднувати концентратори лише в деревоподібних ієрархічних структурах. Будь-які шлейфи між портами хаба не допускаються. [2]

2.3 Фізичне середовище Fast Ethernet

Всі відмінності між Fast Ethernet і Ethernet зосереджені на фізичному рівні. Рівні MAC і LLC в Fast Ethernet залишаються абсолютно незмінними і описані в попередніх розділах стандартів 802.3 і 802.2.

У порівнянні з фізичною реалізацією Ethernet (а їх шість), в Fast Ethernet відмінності між кожним варіантом і іншими глибше - змінюється як кількість провідників, так і способи кодування.

Офіційний стандарт 802.3u встановив три різні специфікації для фізичного рівня Fast Ethernet і дав їм такі назви:

- 100Base-TX для двопарного кабелю на неекранованій крученій парі UTP категорії 5 або екранованій крученій парі STP Toure1;
- 100Base-T4 для чотирипарного кабелю на неекранованій крученій парі UTP категорії 3, 4 або 5;
- 100Base-FX для багатомодового волоконно-оптичного кабелю використовуються два волокна.

Формати кадрів технології Fast Ethernet відрізняються від форматів 10-мегабітних технологій Ethernet.

Міжкадровий інтервал (IPG) становить 0,96 мкс, а бітовий інтервал - 10 нс. Всі часові параметри алгоритму доступу (інтервал відстроочки, час передачі мінімальної довжини кадру і т.д.), виміряні в бітових інтервалах, залишаються незмінними, тому в розділі стандарту, пов'язані з рівнем MAC, не вносилися зміни.

Ознакою вільного стану середовища є передача по ньому символу Idle, що відповідає надлишковому коду, а не відсутність сигналів, як в стандартах Ethernet 10 Мбіт / с.

Фізичний рівень складається з трьох елементів:

- підрівень зв'язки;
- Медіанезалежний інтерфейс (М ІІ)
- у пристрій фізичного рівня (РНУ).

2.3.3 100 Base-FX

Ця специфікація визначає роботу протоколу Fast Ethernet через багатомодове волокно в напівдуплексному та повнодуплексному режимах на основі добре перевіреної схеми кодування FDDI. Як і у випадку зі стандартом FDDI, кожен вузол з'єднаний з мережею двома оптичними волокнами, що йдуть від приймача (Rx) і від передавача (Tx).

Стандарт Fast Ethernet визначає метод кодування 4 В/5 В. У цьому методі кожні 4 біти даних підшару MAC (так звані символи) представлені 5 бітами. Надлишкові біти дозволяють застосовувати потенційні коди, коли кожен з п'яти бітів представлений у вигляді електричних або оптичних імпульсів.

Існування заборонених комбінацій символів дозволяє відхиляти помилкові символи, що підвищує надійність 100 мереж Base-FX.

Для відокремлення кадру Ethernet від символів Idle використовується комбінація роздільника Start (пара символів) (11000) і JK (10001) коду 4V/5V, а після завершення кадру перед першим символом Idle вставляється символ T.

Після того, як 4-бітні фрагменти MAC-кодів будуть перетворені в 5-бітні фрагменти фізичного рівня, вони повинні бути представлені у вигляді оптичних сигналів в кабелі, що з'єднує вузли мережі. Специфікація 100Base-FX використовує метод фізичного кодування, який називається NRZI.

2.3.4 100 Base-TX

Специфікація 100Base-TX використовує кабель UTP категорії 5 або кабель STP Type 1 як носій даних. Максимальна довжина кабелю в обох випадках становить 100 метрів.

Стандарт Fast Ethernet 100 Base-TX визначає метод кодування як 4 В/5 В. Формат кадру в цій специфікації аналогічний формату кадру 100Base-FX.

Основними відмінностями від специфікації 100Base-FX є використання методу MLT3 для передачі сигналів 5-бітних порцій коду 4В/5В по крученій парі, а також наявність функції автоузгодження для вибору режиму роботи порту. Схема автоузгодження дозволяє два фізично з'єднаних пристрої, які підтримують кілька стандартів фізичного рівня, що відрізняються бітрейтом і кількістю скручених парити, вибирати найбільш вигідний режим роботи. Зазвичай автоузгодження відбувається, коли до концентратора або комутатора під'єднується мережевий адаптер, який може працювати на швидкості 10 і 100 Мбіт/с.

Всього в даний час існує 5 різних режимів роботи, які можуть підтримувати пристрої крученої пари 100Base-TX або 100Base-T4:

- 10База-Т - 2 пари Категорії 3;
- 10Base-Т повнодуплексний - 2 пари категорії 3;
- 100Base-TX - 2 пари Категорії 5 (або Тип 1А STP);
- 100Base-T4 - 4 пари Категорії 3;
- Повний дуплекс 100Base-TX - 2 пари Категорії 5 (або Тур 1А STP).

Режим 10Base-Т має найнижчий пріоритет у переговорному процесі, тоді як повнодуплексний режим 100Base-T4 має найвищий. Процес домофона

відбувається при включенні пристрою, а також може бути ініційований в будь-який момент модулем управління пристроєм.

Пристрій, що ініціює процес автоузгодження, посилає своєму партнеру пакет спеціальних імпульсів Fast Link Pulse (FLP), який містить 8-бітне слово, що кодує запропонований режим взаємодії, починаючи з найвищого пріоритету, підтримуваного вузлом. Якщо вузол-партнер підтримує автоузгодження, а також може підтримувати запропонований режим, він відповідає сплеском імпульсів FLP, в якому він підтверджує цей режим, і на цьому переговори закінчуються. Якщо вузол-партнер може підтримувати режим з нижчим пріоритетом, він вказує це у відповіді, і цей режим вибирається як робочий. Таким чином, найвищий пріоритет завжди надається спільному режиму вузлів.

2.3.5 100 Base-T 4

Специфікація 100 Base-T 4 розроблена таким чином, щоб дозволити використовувати існуючу проводку виті пари категорії 3 для передачі 100Мбіт/с.

Замість кодування 4 В/5 В цей метод використовує кодування 8 В/6Т, яке має вузький спектр сигналу і вписується в діапазон виті пари категорії 3 16 МГц (UTP 3) зі швидкістю 33 Мбіт/с.

Кожні 8 біт інформації рівня MAC кодуються 6 трійковими символами s , які є цифрами, що мають три стани. Кожна трійкова цифра має тривалість 40 нсек. Потім група з 6 трійкових цифр передається на одну з трьох передавальних кручених пар незалежно і послідовно.

Четверта пара завжди використовується для прослуховування несучої частоти з метою виявлення зіткнень. Швидкість передачі даних кожної з трьох пар передачі даних становить 33,3 Мбіт/с, тому загальна швидкість протоколу 100Base-T4 становить 100 Мбіт/с. [2]

2.3.6 Фізичне середовище Gigabit Ethernet

Відзначимо схожість між технологією Gigabit Ethernet і технологіями Ethernet і Fast Ethernet:

- Усі формати кадрів Ethernet зберігаються.
- Існує ще напівдуплексна версія протоколу, яка підтримує метод доступу CSMA/CD, і повнодуплексна версія, яка працює з комутаторами.
- Підтримуються всі основні типи кабелів, що використовуються в Ethernet і Fast Ethernet: оптоволоконні, кручена пара категорії 5 і коаксіальні.

Розробка стандарту Gigabit Ethernet поставила перед нами кілька нерозв'язних проблем. Одним з них було завдання забезпечити прийнятний діаметр мережі для напівдуплексної роботи. У зв'язку з обмеженнями CSMA/CD на довжину кабелю, спільна версія Gigabit Ethernet дозволяла б довжину відрізка лише 25 метрів, зберігаючи розмір кадру та всі параметри CSMA/CD незмінними.

Ще однією серйозною проблемою було досягнення бітрейту 1000 Мбіт/с на основних типах кабелів. Навіть для оптоволоконна досягнення такої швидкості пов'язане з деякими труднощами, оскільки технологія Fibre Channel, фізичний рівень якої був використаний як основа для оптоволоконної версії Gigabit Ethernet, забезпечує швидкість передачі даних всього 800 Мбіт/с. Швидкість передачі даних на лінії становить близько 1000 Мбіт/с, але при методі кодування 8 В/10 В корисна швидкість потоку на 25% менша, ніж частота імпульсів на лінії.

І, нарешті, найскладнішим завданням є підтримка кабелю вита пара. Ця проблема була вирішена завдяки використанню новітніх методів кодування сигналу, щоб гарантувати, що спектр сигналу не перевищує смугу пропускання кабелю.

Для того, щоб розширити максимальний діаметр мережі Gigabit Ethernet в напівдуплексному режимі до 200 метрів, мінімальний розмір кадру був збільшений (без урахування преамбули) з 64 до 512 байт або до 4096 bt.

Відповідно, час подвійного обертання тепер також може бути збільшено до 4095 bt, що робить діаметр мережі близько 200 м прийнятним при використанні одного ретранслятора.

Щоб збільшити довжину кадру до необхідного значення, мережевий адаптер повинен доповнити поле даних довжиною до 448 байт так званім екстентом, що представляє собою поле, заповнене забороненими символами коду 8В/10В, які не можна прийняти за коди даних.

Щоб зменшити накладні витрати на використання занадто довгих кадрів для передачі коротких надходжень, розробники стандарту дозволили кінцевим вузлам передавати кілька кадрів поспіль, без перенесення середовища на інші станції. Цей режим називається серійною зйомкою. Станція може передавати кілька кадрів поспіль загальною довжиною не більше 65 536 біт або 8192 байт. Якщо станції потрібно передати кілька невеликих кадрів, вона може не розширювати їх до розміру 512 байт, а передавати поспіль до вичерпання ліміту в 8192 байт (це обмеження включає всі байти кадру, включаючи преамбулу, назву, дані та контрольну суму). Обмеження у 8192 байти називається довжиною серійної зйомки. Якщо станція починає передавати кадр і в середині кадру досягається межа довжини серійної зйомки, то кадр дозволяється передавати до кінця.

2.3.7 1000 Base-X

Специфікація 1000BASE-X передбачає використання середовища у вигляді оптичних волокон. Цей стандарт заснований на технології, заснованій на стандарті ANSI Fibre Channel (ANSI X 3T11).

Технологія 1000 BASE-X дозволяє використовувати три різні середовища передачі, звідси три різновиди: 1000 BASE-SX, 1000 BASE-LX і 1000 BASE-CX.

2.3.8 1000 Base-SX

Найбільш часто використовувана і дешева технологія, заснована на стандартному багатомодовому волокні. Максимальна дистанція для 1000BASE-SX становить 220 метрів. Використовується довжина хвилі 850 нм, S розшифровується як Short Wavelength.

Очевидно, що такого значення можна досягти тільки при повнодуплексній передачі даних, так як час подвійного обертання сигналу на двох відрізках по 220 метрів становить 4400 bt, що перевищує межу в 4095 bt навіть без урахування ретранслятора і мережевих адаптерів. Для напівдуплексної передачі максимальні значення відрізків оптоволоконного кабелю завжди повинні бути менше 100 метрів.

2.3.9 1000 Base-LX

Технологія 1000 BASE-LX зазвичай використовується з одномодовими волокнами, де допустима відстань становить 5 кілометрів. Специфікація 1000Base-LX також може працювати на багатомодовому кабелі. При цьому максимальна дистанція невелика - 550 метрів.

Для специфікації 1000Base-LX в якості джерела випромінювання завжди використовується напівпровідниковий лазер з довжиною хвилі 1300 нм.

2.3.10 1000 Base-CX

Технологія 1000 BASE-CX використовує найбільш своєрідне середовище з трьох. Це прикладне рішення, в якому використовуються кабелі на основі попередньо обтиснутих екранованих кручених пар.

Роз'єм не є простим RJ45, який зазвичай використовується в 10/100/1000 Base-T. Замість цього для комплектації цих двох пар проводів використовується DB-9 або HSSDS. Технологія 1000 BASE-CX працює на відстанях до 25 м, що обмежує її застосування невеликими площами. [3]

2.3.11 1000 Base-T

Специфікація 1000 Base-T працює на крученій парі категорії 5.

Кожна пара кабелю категорії 5 має гарантовану смугу пропускання до 100 МГц. Для того, щоб передавати дані зі швидкістю 1000 Мбіт/с по такому кабелю, було прийнято рішення організувати паралельну передачу одночасно по всіх 4 парах кабелю.

Це відразу знизило швидкість передачі даних для кожної пари до 250Мбіт/с.

Для кодування даних використовувався код PAM5, що використовує 5 рівнів потенціалу: -2, -1, 0, +1, +2. Таким чином, на одній парі за один цикл передається 2,322 біта інформації. Тому тактову частоту можна зменшити з 250 МГц до 125 МГц. При цьому, якщо використовувати не всі коди, а передавати по 8 біт за такт (4 пари), то необхідна швидкість передачі 1000 Мбіт/с зберігається, і ще залишається запас невикористаних кодів, так як код PAM5 містить $5^4 = 625$ комбінацій, а якщо передавати 8 біт даних за один такт для всіх чотирьох пар, то потрібно тільки $2^8 = 256$ комбінацій. Інші комбінації приймач може використовувати для контролю отриманої інформації та підсвічування правильних комбінацій на тлі шумів. Код PAM5 на частоті 125 МГц вписується в діапазон 100 МГц кабелю категорії 5.

Для виявлення колізій і повнодуплексної роботи в специфікації використовується техніка, при якій обидва передавача працюють назустріч один одному на кожній з 4 пар в одному діапазоні частот, оскільки вони використовують один і той же потенційний код PAM5. Гібридна схема ізоляції N дозволяє приймачу та передавачу одного блоку використовувати котушку крученої пари як для прийому, так і для передачі.

3. ПОТОКОВЕ ПЕРЕДАВАННЯ МУЛЬТИМЕДІА З ПЕРІОДИЧНИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ

3.1 Математична постановка задачі

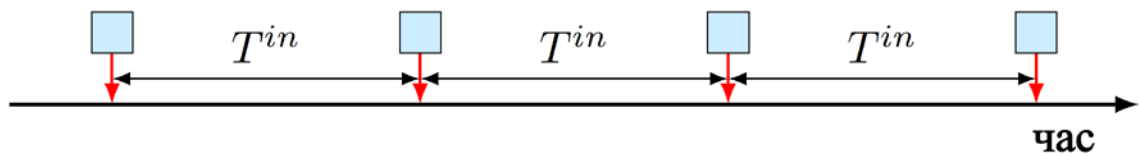
Ми досліджуємо передачу чутливих до QoS мультимедійних потоків безпосередньо між двома пристроями з використанням періодичного резервування каналів за наявності завад.

Розглянемо пару пристроїв: відправника і одержувача. У чергу відправника надходить потік, який потрібно доставити одержувачу. У роботі розглядаються такі види потоків.

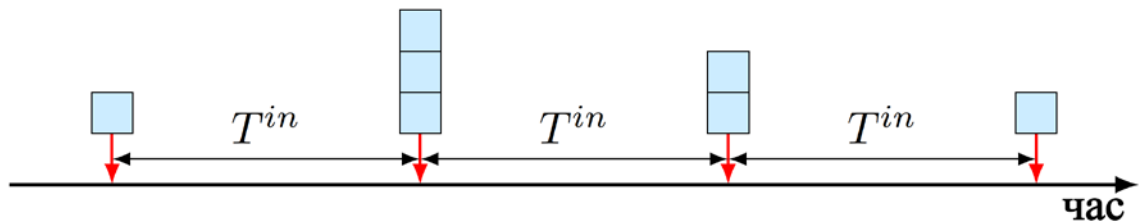
- Потік постійної інтенсивності, показаний на рис. 3.1 (а). Пакети надходять в чергу відправника періодично по одному через інтервал T^{in} , який називається періодом потоку. Наприклад, такий потік може генеруватися голосовими додатками за допомогою кодеків G.711 або G.729.

- Потік змінної інтенсивності показаний на рис. 3.1 (б). Пачки пакетів надходять в чергу відправника періодично через певні проміжки часу T^{in} , який також називається періодом потоку. Розміри кожної пачки пакетів (кількість пакетів у пачці) є незалежними випадковими величинами і з ймовірністю p_i^{in} розмір пачки дорівнює i , $i \in \{1, \dots, M\}$, Де M – максимальний розмір пачки пакетів. Такий потік характерний для потоків стисненого відео, що передається за допомогою протоколу RTP [14], коли відеокадри мають різний розмір і для передачі кожного кадру необхідно, різна кількість пакетів. Очевидно, що потік постійної інтенсивності є окремим випадком потоку змінної інтенсивності при $p_1^{in} = 1$ і $p_i^{in} = 0, i > 1$.

Відправник вимірює параметри потоку (період і розподілення розміру пачок) і якість каналу. Якість каналу можна описати використовуюваною сигнально-ковою конструкцією (номінальною швидкістю передачі даних) і ймовірністю невдалої спроби передачі q .



(а) Потік постійної інтенсивності



(б) Неординарний потік змінної інтенсивності

Рисунок 3.1 – Типи потоків, що розглядаються

Таким чином, враховується, що передача пакетів в зарезервовані інтервали часу не захищена від випадкових шумів і завад від далеких і застарілих пристроїв. Для простоти припустимо, що спроби передачі зазнають невдачі незалежно одна від одної, і короткі кадри підтвердження надійно доставляються. Тому пакети можуть бути відкинуті тільки в тому випадку, якщо термін їх служби закінчився.

Припустимо, відправнику також відомі вимоги QoS до потоку, що передається, зазначені у вигляді максимально допустимих термінів доставки D^{QoS} -пакетів і відсотка втрачених PLR^{QoS} -пакетів. Періодично відправник самостійно або за допомогою хмарного сервісу виконує розрахунок параметрів резервування (періоду T^{res} і тривалості D^{res} зарезервованих інтервалів часу) і найбільш ефективною схемою передачі даних з множини даних, перелічених у розділі 1.3.3 з точки зору мінімального споживання ресурсів каналу при дотриманні вимог до якості обслуговування.

Проблема полягає в тому, як вибрати параметри резервування та спосіб передачі, які гарантують, що вимоги до якості обслуговування (виражені в термінах D^{QoS} та PLR^{QoS}) задовольняються з мінімальною часткою зайнятого

часу каналу C :

$$C = \frac{D^{res}}{T^{res}}. \quad (3.1)$$

Зауважимо, що якщо станція резервує занадто багато часу каналу, це призведе до втрати ресурсів каналу для передач сусідніх станцій. Простою каналу може виникати як коли починається зарезервованій часовий проміжок, але станція не має даних для передачі, так і коли обсяг даних для передачі менший, ніж той, який може бути переданий протягом усього зарезервованого часового інтервалу. Однак стандарт дозволяє звільнити цей час, відправивши кадр CF-End (Contention-Free End – закінчення неконкурентного доступу), це може бути неефективним з кількох причин. По-перше, деякі станції можуть не приймати CF-End, оскільки вони розташовані занадто далеко від передавача, але близько до приймача відповідного резервування. По-друге, на початку зарезервованого часового проміжку сусідні станції можуть перейти в режим сну, тому вони не зможуть прийняти цей CF-End. З цих причин ми будемо вважати, що каналні ресурси споживаються протягом усього терміну резервування, незалежно від того, чи відбуваються будь-які передачі в зарезервовані проміжки часу чи ні.

У роботі удосконалено метод математичного моделювання передачі чутливих до затримки даних з використанням періодичних резервувань. Для опису методу розглядаються різні комбінації вхідних потоків і схем передачі, від найпростішого випадку потоків постійної інтенсивності і одиночними передачами до випадку блокової передачі потоку змінної інтенсивності.

Розроблений метод дозволяє оцінити відсоток втрачених пакетів і потребу в ресурсах каналу для заданого потоку, схему передачі і параметри резервування. Таким чином, за допомогою перебору можна знайти такі параметри резервування та схему передачі, які мінімізують споживання часу каналу, задовольняючи заздалегідь визначені вимоги QoS.

Таблиця 3.1. Вхідні та вихідні параметри методу вибору опції резервування

Вхідні параметри	
T^{in}	Інтервал між пачками пакетів
$\{P_i^{in}\}$	Розподілення розмірів пачок пакетів
D^{QoS}	Обмеження на час доставки пакетів
PLR^{QoS}	Обмеження на долю пакетів, не доставлених за час D^{QoS}
q	Імовірність невдалої спроби передачі пакета в середині зарезервованого інтервалу
L	Довжина пакету
MCS	Сигнально-кодова конструкція, яка використовується для передачі пакетів всередині зарезервованого інтервалу.
Вихідні параметри	
$TXMETHOD$	Схема передачі даних з числа перерахованих в розділі 1.4.2
T^{res}	Період резервування
B	Кількість спроб передачі пакету всередині зарезервованого інтервалу (у випадку одиночної передачі $B=1$)

Іншими словами, можна знайти оптимальні вихідні параметри для будь-якого заданого вхідного параметра, перелічені в таблиці 3.1.

3.2 Математичні моделі передачі даних з використанням періодичного резервування

3.2.1 Основна ідея

Незалежно від того, який вхідний потік передається і яка схема передачі використовується, уявімо собі процес передачі потоку даних у вигляді кола Маркова з дискретним часом, з кроком T^{res} , таким, що моменти часу t і $t + 1$ відповідають витокам послідовних зарезервованих інтерфейсів [6; 9]. Стан кола Маркова буде описуватися одним або декількома цілими числами. Кількість цих чисел і їх значення залежать від типу потоку і способу передачі. У будь-якому випадку вони повинні мати можливість отримати вік головного пакета в момент часу t . Визначивши ймовірність переходу і вивівши стаціонарний розподіл ймовірностей, можна знайти значення частки втрачених пакетів (PLR) для

заданих вхідних параметрів як

$$PLR = \frac{I^{dis}}{I^{in}}, \quad (3.2)$$

де I^{in} і I^{dis} – середнє число пакетів, які з'являються на передавальному пристрої і відкидаються в межах T^{res} , відповідно.

Істотною особливістю запропонованого підходу є те, що зростання пакетів виражається в спеціально введених одиницях часу, які ми будемо називати слотами. Тривалість слота визначається наступним чином:

$$\tau = \text{НОД}(T^{in}, T^{res}).$$

Зауважимо, що $\text{НОД}(\cdot)$ зазвичай, визначається лише для цілих аргументів, а значення T^{in}, T^{res} в загальному випадку не є цілими числами. Однак, виразивши їх у відповідних одиницях (наприклад, мілісекундах або несекундах), а потім округливши їх, можна отримати цілочисельне наближення з будь-яким заданим ступенем точності.

Виразимо тривалості всіх часових інтервалів у слотах:

$$t^{in} = \frac{T^{in}}{\tau} \in \mathbb{N}, \quad t^{res} = \frac{T^{res}}{\tau} \in \mathbb{N}.$$

Розіб'ємо вісь часу на слоти так, щоб кожен зарезервованний інтервал починався з деякої межі слота (рис. 3.2) Це можливо тому, що період T^{res} кратний τ . Зауважимо, що в реальності моменти, коли з'являються пакети і положення зарезервованих інтервалів, схильні до випадкових зсувів, так що виконане вирівнювання на практиці неможливе. Однак для простоти ми не будемо враховувати ці ефекти при розробці математичної моделі для потокової передачі даних, чутливих до якості.

Нехай ξ - інтервал між двома моментами часу: при відправці пакета в чергу передавача і при запуску наступного слота ($0 \leq \xi < \tau$). Зверніть увагу, що ξ однаковий для всіх пакетів. Таким чином, можна практично змістити всі моменти надходження пакета вперед на ξ і при цьому зуміти зменшити допустиму затримку D^{QoS} до ξ . Цей прийом не впливає на числові характеристики процесу передачі, але виключає з розгляду параметр ξ .

Назвемо вік пакета часом, що минув з моменту надходження пакета в чергу передавального пристрою. Згідно з цим формальним визначенням, пакети, які вже стоять у черзі, мають невід'ємний вік, а й вік майбутніх пакетів негативний.

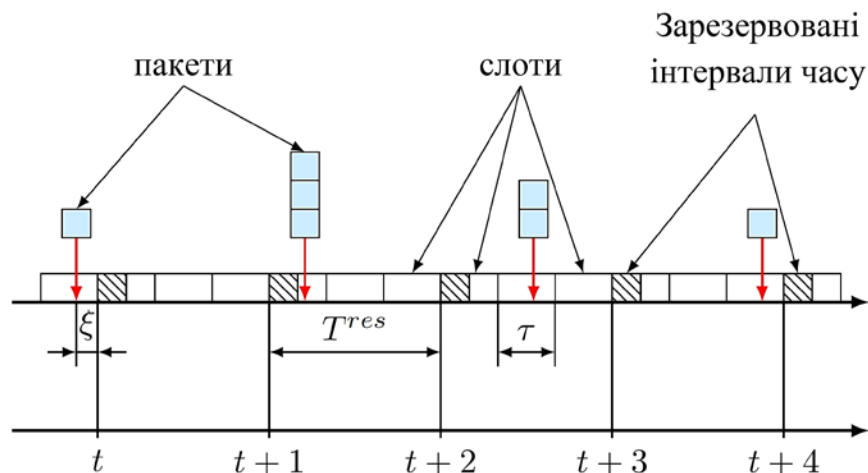


Рисунок 3.2 – Розглянуте коло Маркова з дискретним часом

Ми будемо називати найстаріший пакет в черзі головним пакетом, якщо черга не порожня, а якщо черга порожня, то наступний пакет, який прибуде в чергу. Таким же чином ми визначаємо головну пачку пакетів, якщо пакети надходять в чергу пачками. Якщо явно не вказано інше, у цьому розділі параметр $a(t)$ відноситься до віку головного пакета, вираженого в часових проміжках, У зв'язку з віртуальним зсувом на ξ в момент надходження пакетів, зокрема, вік $a(t)$ головного пакета дорівнює цілому числу слотів в будь-який момент спостереження t . Зокрема:

- Якщо черга не порожня в момент часу t , то вік $a(t)$ - це кількість

цілочисельних слотів, які головний пакет провів у черзі. У цьому випадку $a(t) \geq 0$ і значення $a(t) \cdot \tau > 0$ дорівнює часу, який головний пакет провів у черзі.

- Якщо черга порожня, то $a(t) < 0$ і значення $|A(t) \cdot \tau|$ — це час, поки наступний пакет не потрапить до черги.

Оскільки всі застарілі пакети відразу ж відкидаються, то вік пакета не може перевищувати D^{QoS} , тобто в будь-який момент часу виконується нерівність $a \cdot \tau \leq D^{QoS}$, і найвище значення $a(t)$ дорівнює $d = \left[\frac{D^{QoS}}{\tau} \right]$. А що стосується

мінімально можливого значення a , воно спостерігається після того, як пакет надійде в чергу передачі, зарезервованій інтервал і всі пакети в черзі доставляються. Таким чином, відразу після резервування черга порожня і наступний пакет приходить в чергу через t^{in} . Однак наступного разу стан кола

Маркова буде визначено тільки через період t^{res} . На цьому етапі вік головного пакета в черзі буде $\max\{t^{res} - t^{in}, 0\}$.

Вище ми виходили з того, що посилка не вважається застарілою і може бути передана в зарезервованій проміжок часу, якщо її вік не перевищує D^{QoS} на початку цього інтервалу. Однак для того, щоб пакет не був відкинутий як передавачем, так і приймачем, час його доставки має бути менше D^{QoS} . Загальний термін доставки посилки складається з двох складових:

- часу, який пакет проводить у черзі до початку зарезервованого інтервалу, в який він буде доставлений, та
- часу від початку цього інтервалу до моменту, коли одержувач успішно приймає пакет.

У випадку з сучасними мережами Wi-Fi другий компонент зазвичай на кілька порядків менше першого. Типові значення D^{QoS} складають близько сотні мс, в той час як в сучасних мережах Wi-Fi час передачі пакетів становить менше 1 мс і не має особливого впливу, як показують числові результати в розділі 3.3. Однак час передачі пакетів може бути враховано, зменшивши початкове значення D^{QoS} , зазначене у вимогах до якості послуги, на довжину D^{res} зарезервованого інтервалу часу.

3.2.2 Потік постійної інтенсивності і одиночні передачі

Продемонструємо, як використовувати запропонований у розділі 3.2.1 підхід для аналізу потоку пропускання постійної інтенсивності [9]. Припустимо, що $t^{res} \leq t^{in}$ і $t^{in} \leq d$. Дійсно, немає сенсу встановлювати резервування з періодом $T^{res} > T^{in}$, так як це призводить до втрат пакетів тільки через недостатність ресурсів, навіть в разі ідеальних каналних умов ($q = 0$). Крім того, ми не розглядаємо потоки, для яких $T^{in} \geq D^{QoS}$, тому що вони не характерні для потокової передачі медіаданих.

За цих умов $a \in \{t^{res} - t^{in}, \dots, d\}$. Мінімальне значення $t^{res} - t^{in}$ досягається в момент часу t , якщо пакет надходить в порожню чергу в момент $t - 1$ і доставляється з першої спроби.

Дійсно, оскільки інтервал між входженням двох пакетів в чергу дорівнює t^{in} в слотах, знаючи a , можна знайти вік головного пакета в черзі, а також вік всіх наступних пакетів, якщо вони. Таким чином, можна зафіксувати можливі переходи між станами кола Маркова і ймовірності цих переходів.

Якщо $a < 0$, то в момент часу t черга порожня, і до надходження в чергу наступного пакета $|a|$ слотів. Якщо $a < -t^{res}$, то до моменту $t + 1$ пакети не з'являються. Іншими словами, при $t + 1$ черга все одно буде порожньою, хоча кількість слотів до надходження наступного пакета в чергу зменшиться до $|a + t^{res}|$. Якщо $a \geq -t^{res}$, то пакет надійде в чергу в момент часу $t + 1$, а в момент часу $t + 1$ його вік буде $a + t^{res}$. Таким чином, незалежно від значення a , коло переходить в стан $a + t^{res}$ з ймовірністю 1.

Якщо $0 \leq a \leq d - t^{res}$, то черга не порожня, і термін дії найстарішого пакета не закінчиться на $t + 1$. Якщо спроба передачі не вдалася в поточному зарезервованому інтервалі (що відбувається з ймовірністю q), то в момент часу $t + 1$ вік найстарішого пакета буде $a + t^{es}$, тобто коло переходить в стан $a + t^{res}$. В іншому випадку (з ймовірністю $1 - q$) коло переходить в стан $a + t^{res} - t^{in}$, тому що найстаріший пакет успішно передається, а другий пакет у черзі стає найстарішим у момент часу $t+1$.

Якщо $a > d - t^{\text{res}}$, то черга не порожня, і найстаріший пакет буде застарілим за часом $t + 1$. Іншими словами, незалежно від того, чи буде спроба передати головний пакет успішною, коло перейде в стан $a + t^{\text{res}} - t^{\text{in}}$.

Такий чином, визначивши матрицю переходу P , можна знайти стаціонарний розподіл, π_a станів кола Маркова, вирішити наступну систему лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} \pi_a^T P = \pi_a^T, \\ \sum_a \pi_a = 1. \end{cases} \quad (3.3)$$

Крім того, оскільки коло є незвідною і позитивно поворотною, існує єдиний розв'язок (3.3) і $\forall a \Rightarrow \pi_a = 1$.

Зауважимо, що якщо $t^{\text{in}} \leq t^{\text{res}}$, не можна залишити підмножину з t^{res} станів з найвищими значеннями a . Іншими словами, переходи до станів $a \leq d - t^{\text{res}}$ зі станів $a > d - t^{\text{res}}$ неможливі. Однак і в цьому випадку всі стани утворюють один і той же комутативний клас. Оскільки коло однорідне за часом і всі стани належать до одного комутативного класу, існує тільки один розв'язок системи (3.3).

Щоб знайти відсоток втрачених пакетів PLR з (3.2), потрібно отримати Γ^{in} і Γ^{dis} . Для потоку постійної інтенсивності вірно наступне:

$$I^{\text{in}} = \frac{1}{T^{\text{in}}}. \quad (3.4)$$

Щоб знайти Γ^{dis} , зауважимо, що пакет відкидається тільки після невдалої передачі зі стану a такого, що $a > d - t^{\text{res}}$. Таким чином, середня частка скинутих пакетів дорівнює

$$I^{\text{dis}} = \frac{q}{T^{\text{res}}} \sum_{a > d - t^{\text{res}}} \pi_a. \quad (3.5)$$

Підставляючи (3.4) і (3.5) в (3.2), отримуємо PLR.

3.2.3 Неординарний потік змінної інтенсивності з послідовними передачами

Розглянемо послідовну передачу потоку змінної інтенсивності. У цьому випадку тривалість зарезервованих інтервалів часу дозволяє здійснювати до B послідовних передач пакетів протягом кожного інтервалу. У цьому розділі ми знімаємо обмеження $t^{res} \leq t^{in}$, тому що навіть коли $t^{res} > t^{in}$, можна компенсувати розрідженість зарезервованих інтервалів більшим значенням B . Єдиними обмеженнями, що залишилися, є $t^{in} \leq d$ і $t^{res} \leq d$.

У роботі окремо не обговорюється використання одиночних передач для доставки потоку змінної інтенсивності, оскільки це окремий випадок послідовної передачі при $B = 1$.

Для того, щоб описати передачу потоку пакетів змінної інтенсивності, введемо нову змінну стану m , яка дорівнює числу пакетів віку a , тобто числу пакетів в найстарішій пачці.

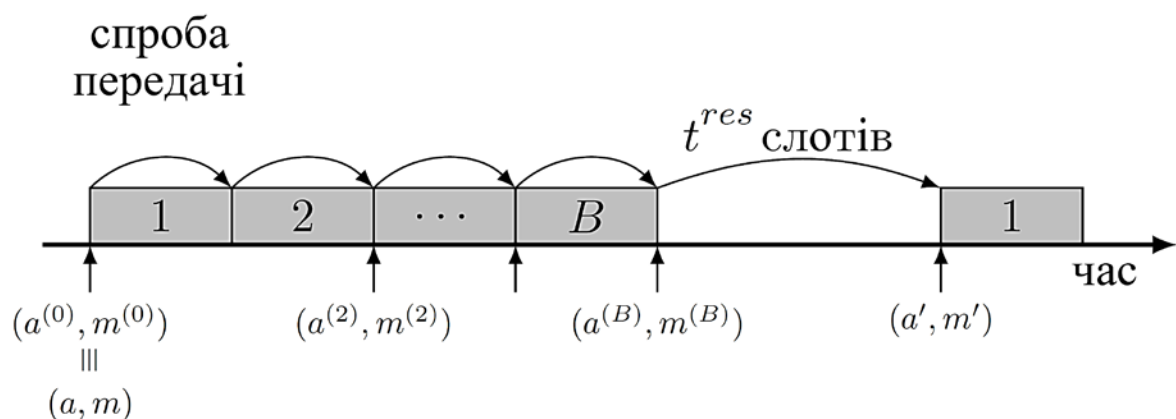


Рисунок 3.3 – Проміжні стани і переходи між ними.

Таким чином, стан кола Маркова в момент часу t визначається парою цілих чисел (a, m) .

Для спрощення опису переходів розіб'ємо перехід від (a, m) до (a', m') у проміжні переходи $B+1$, ввівши проміжні стани B , які відповідають станам системи після кожної спроби передачі B (рис. 3.3). Опишемо кожен проміжний стан i , $i \in \{1, \dots, B\}$ парою $(a^{(i)}, m^{(i)})$, де значення параметрів $a^{(i)}$ і $m^{(i)}$ те ж саме, що і при описі основних станів кола Маркова, але $a^{(i)}$ і $m^{(i)}$ пов'язані з моментом часу, що безпосередньо слідує за спробою передачі i . Нехай $(a^{(0)}, m^{(0)})$ позначають стан (a, m) на початку зарезервованого інтервалу. $(a^{(i)}, m^{(i)})$ – проміжний стан i ($i \in \{0, \dots, B\}$), що відповідає часу t .

Природа проміжних переходів $B+1$ така. Кожному з перших переходів B відповідає одна спроба передачі пакета. У сумі вони призводять до переходу з початкового стану $(a, m) \equiv (a^{(0)}, m^{(0)})$ в момент часу t в проміжний стан $(a^{(B)}, m^{(B)})$, що відповідає закінченню зарезервованого інтервалу. Перехід $B + 1$ відповідає стрибку часу тривалості T^{res} , викликаному переходом з одного зарезервованого інтервалу в інший. Припустимо, що всі B передач відбуваються миттєво одна за одною: кожна передача запускається на початку зарезервованого інтервалу і має нульову тривалість. При такому припущенні жоден пакет не відкидають під час проміжних переходів, оскільки вік пакетів не збільшуються.

Опишемо переходи між проміжними станами. Нехай $(a^{(i)}, m^{(i)})$ – стан системи перед спробою передачі $i + 1$, $i \in \{0, \dots, B - 1\}$. Знайдемо, в які проміжні стани $(a^{(i+1)}, m^{(i+1)})$, система може перейти.

- Якщо $a^{(i)} < 0$, то черга порожня і система залишається в стані $(a^{(i)}, m^{(i)})$ з ймовірністю 1.

- Якщо $a^{(i)} \geq 0$, черга не порожня, і пакет передається.

- З ймовірністю q передача зазнає невдачі і система залишається в стані $(a^{(i)}, m^{(i)})$.

- З ймовірністю $1 - q$ передача пройде успішно. Якщо $m^{(i)} = 1$, то система переходить в стан $(a^{(i)} - t^{\text{in}}, j)$ з j пакетами в головній пачці. Ймовірність такого переходу дорівнює $(1 - q) p_j^{\text{in}}$, $j = 1, \dots, M$. Інакше, тобто якщо $m^{(i)} > 1$, система переходить в стан $(a^{(i)}, m^{(i)} - 1)$.

Найменше можливе значення $a^{(i)}$ в проміжному стані дорівнює $-t^{\text{in}}$. Це

значення досягається, якщо пачка входить в порожню чергу на початку зарезервованого інтервалу і повністю передається до кінця інтервалу. Таким чином, останній проміжний стан має від'ємне значення, рівне $-t^{in}$.

З останнього проміжного стану $(a^{(B)}, m^{(B)})$ система переходить у стан (a', m') на початку наступного зарезервованого інтервалу.

- Якщо $a^{(B)} \leq d - t^{res}$, то система переходить у стан $(a^{(B)} + t^{res}, m^{(B)})$.
- Якщо $a^{(B)} > d - t^{res}$, то найстаріший пакет, який на даний момент є $a^{(B)}$, буде застарілим за часом $t + 1$ і відкидається. Якщо значення t^{res} занадто високе, то кілька мачок пакетів, що слідує за найстарішим пакетом, також застаріють, що призведе до відкидання додаткових пакетів. Оскільки пакети надходять до черги через кожен інтервал t^{in} , кількість $n_{(a^{(B)}, m^{(B)})}$ пакетів, скинутих пачок пакетів визначається наступним чином:

$$n_{(a^{(B)}, m^{(B)})} = \begin{cases} \left\lceil \frac{a^{(B)} + t^{res} - d}{t^{in}} \right\rceil, & \text{якщо } t^{res} > t^{in} \\ 1, & \text{якщо } t^{res} \leq t^{in} \end{cases}.$$

Таким чином, система переходить в стан $(a^{(B)} + t^{res} - n_{(a^{(B)}, m^{(B)})} t^{in}, m^{(B)})$.

Нехай A – перехідна матриця ймовірностей для кожного з перших проміжних переходів B , а C – матриця, що описує ймовірності останнього проміжного переходу. Таким чином, перехідну матрицю P для підсумкового кола Маркова можна знайти наступним чином:

$$P = A^B C.$$

Знаючи P , знаходимо стаціонарний розподіл ймовірностей $\pi_{(a,m)} = (\dots, \pi_{(a,m)}, \dots)^T$ станів кола Маркова.

Щоб знайти відсоток втрачених PLR-пакетів, зауважимо, що пакети можуть бути відкинуті лише під час проміжного переходу $B+1$. Знайдемо стаціонарний

розподіл ймовірностей $\tilde{\pi}_{(a,m)}$ станів системи перед цим переходом:

$$\tilde{\pi}_{(a,m)}^T = \pi_{(a,m)}^T A^B.$$

Після цього PLR можна знайти наступним чином:

$$PLR = \frac{T^{in}}{T^{res}} \frac{\sum_{(a,m):h>d-t^{res}} \tilde{\pi}_{(a,m)} \left(m + n_{(a,m)} \sum_{j=1}^M j \cdot p_j^{in} \right)}{\sum_{j=1}^M j \cdot p_j^{in}}.$$

3.2.4 Неординарний потік змінної інтенсивності та безумовні повторні спроби передачі

Побудуємо коло Маркова, що описує передачу неординарний потік змінної інтенсивності з використанням безумовних повторень [6]. У разі безумовних повторів кожен зарезервованій інтервал повністю зайнятий B послідовними спробами передачі лише одного пакету. Оскільки в кожному інтервалі t^{res} , може бути передано не більше одного пакета, ми припускаємо, що $t^{res} \leq t^{in}$. В іншому випадку пакети будуть відкинуті навіть при передачі потоку постійної швидкості по ідеальному каналу. Однак це непрактично.

Ми будемо спостерігати передачу потоку за допомогою безумовних спроб на початку зарезервованих інтервалів часу і опишемо стан кола Маркова двома цілими числами (a, m) , що мають однакове значення, як в розділі 2.2.3. Знайдемо, в які стани (a', m') і з якими ймовірностями може переходити ланцюжок зі стану (a, m) .

Якщо $a < 0$, то черга порожня, а коло залишається в стані (a, m) з ймовірністю 1.

Якщо $0 \leq a \leq d - t^{res}$, то черга не порожня і пакет передається.

Якщо жодна з B спроб передачі пакетів не зазнала успіху, тоді коло

переходить в стан $(a+t^{\text{res}}-t^B, j)$ с j пакетами в головній пачці. Імовірність такого переходу дорівнює $q^B p_j^{\text{in}}$.

У разі успішної передачі пакета можуть виникнути такі ситуації:

* Якщо $m = 1$, передаються всі пакети головного пакета і коло переходить в стан $(a+t^{\text{res}}-t^B, j)$, $j = 1, \dots, M$, з ймовірністю $(1-q^B) p_j^{\text{in}}$.

* Якщо $m > 1$, то коло переходить в стан $(a+t^{\text{res}}, m-1)$ з ймовірністю $1-q^B$.

Якщо $a > d-t^{\text{res}}$, головний пакет в будь-якому випадку залишає чергу. В цьому випадку система переходить в стан $(a+t^{\text{res}}-t^B, j)$, $j = 1, \dots, M$, з ймовірністю p_j^{in} .

Використовуючи матрицю перехідних ймовірностей P , знайдемо стаціонарний розподіл ймовірностей $\pi_{(a,m)}$.

Нарешті, відсоток втрачених PLR-пакетів можна знайти наступним чином:

$$PLR = \frac{T^{\text{in}}}{T^{\text{res}}} \frac{\sum_{(a,m)} \pi_{(a,m)} q^B + \sum_{\substack{(a,m): \\ a > d - t^{\text{res}}}} \pi_{(a,m)} (m-1)}{\sum_{j=1}^M j \cdot p_j^{\text{in}}}.$$

3.2.5 Блокова передача неординарного потоку змінної інтенсивності

Розглянемо процедуру блочної передачі потоку змінної інтенсивності, при якій всередині кожного зарезервованого інтервалу передається до B найстаріших пакетів з черги [4]. Якщо спроби передачі будь-яких з пакетів не вдалились і якщо до наступного зарезервованого інтервалу час життя пакета не перевищує D^{QoS} , то ці пакети повторно передаються в цьому інтервалі. Для простоти в роботі розглядається випадок, коли помилки передачі в межах зарезервованого інтервалу виникають незалежно. Випадок корельованих помилок передачі був

вивчений в [15].

Як і в попередніх моделях, передача пакетів моделюється за допомогою кола Маркова дискретного часу, і, як і раніше, ми виберемо T^{res} як крок кола Маркова. Таким чином, моменти t і $t+1$ спостереження кола Маркова відповідають початкам двох послідовних зарезервованих інтервалів.

Беручи до уваги моделі, розроблені в розділах 2.2.2 – 2.2.3, можна описати стан системи в моменти часу $t, t + 1, \dots$ з допомогою цілочисельного вектора, який включає одну або декілька компонент, які відповідають за вік головного пакету. Однак, на відміну від розглянутих раніше схем передачі, недостатньо зберігати тільки вік одного головного пакета. Так як пакети одного і того ж блоку успішно доставляються до приймача незалежно один від одного, то вік перших B пакетів. Наприклад, стан кола Маркова, що відповідає розглянутому процесу передачі, можна описати вектором $(a_1, a_2, \dots, a_B, m_B)$, де a_1, a_2, \dots, a_B – вік перших пакетів B у порядку убутання ($a_1 \geq a_2 \geq \dots \geq a_B$), а m_B – кількість пакетів віку a_B . Хоча цей підхід може бути використаний для знаходження відсотка втрачених PLR-пакетів, він призводить до величезної кількості станів і високої обчислювальної складності. Саме тому ми пропонуємо інший підхід, який значно знижує обчислювальну складність аналітичної моделі.

3.2.6 Визначення відсотка втрачених PLR-пакетів

Якщо коло знаходиться в стані (s, α) , то ймовірність успішної передачі i пакетів протягом зарезервованого інтервалу часу дорівнює $P_{\text{tx}}(i, \min\{s, B\})$. Нехай p_i^{out} – ймовірність того, що i пакетів успішно передані в продовж зарезервованого інтервалу. Цю ймовірність можна знайти наступним чином:

$$p_i^{\text{out}} = \sum_s P_{\text{tx}}(i, \min\{s, B\}) \pi_s,$$

де $\pi_s = \sum_{\alpha} \pi_{s,\alpha}$ – ймовірність того, що розмір черги дорівнює s на початку

зарезервованого інтервалу.

I^{in} і I^{out} обчислюються наступним чином :

$$I^{in} = \frac{1}{T^{in}} \sum_{i=1}^M i \cdot p_i^{in}$$

$$I^{out} = \frac{1}{T^{res}} \sum_{j=1}^B j \cdot p_j^{out}$$

Нарешті, різниця між I^{in} і I^{out} , поділена на I^{in} , дає PLR:

$$PLR = \frac{I^{dis}}{I^{in}} = 1 - \frac{I^{out}}{I^{in}} = 1 - \frac{T^{in}}{T^{res}} \frac{\sum_{j=1}^B j \cdot p_j^{out}}{\sum_{i=1}^M i \cdot p_i^{in}}$$

3.3 Числові результати

3.3.1 Особливості використання періодичних резервувань

Ми покажемо, як використовувати розроблений в розділі 3.2 підхід для оптимізації передачі мультимедійного потоку, тобто вибрати таку схему передачі і параметри резервування, що дозволяють задовольнити вимоги якості обслуговування для даного потоку при мінімальних витратах ресурсів каналу.

Почнемо з послідовної передачі потоку постійної інтенсивності з періодом надходження пакета $T^{in} = 20$ мс, що відповідає використанню голосових кодеків типу G.711 і G.729. Для початку припустимо, що $\xi = 0$, тобто пакет надходить в чергу саме на початку деяких слотів. На рис. 3.7 (а) показано, як відсоток втрати пакета PLR залежить від періоду резервування T^{res} для $q = 0,3$ і допустимої затримки D^{QoS} .

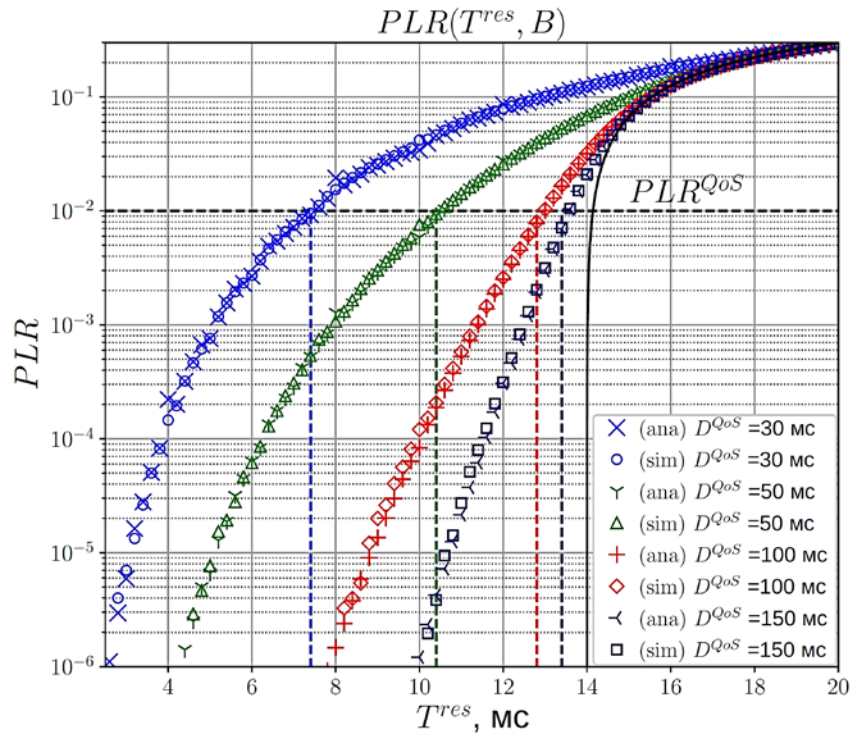
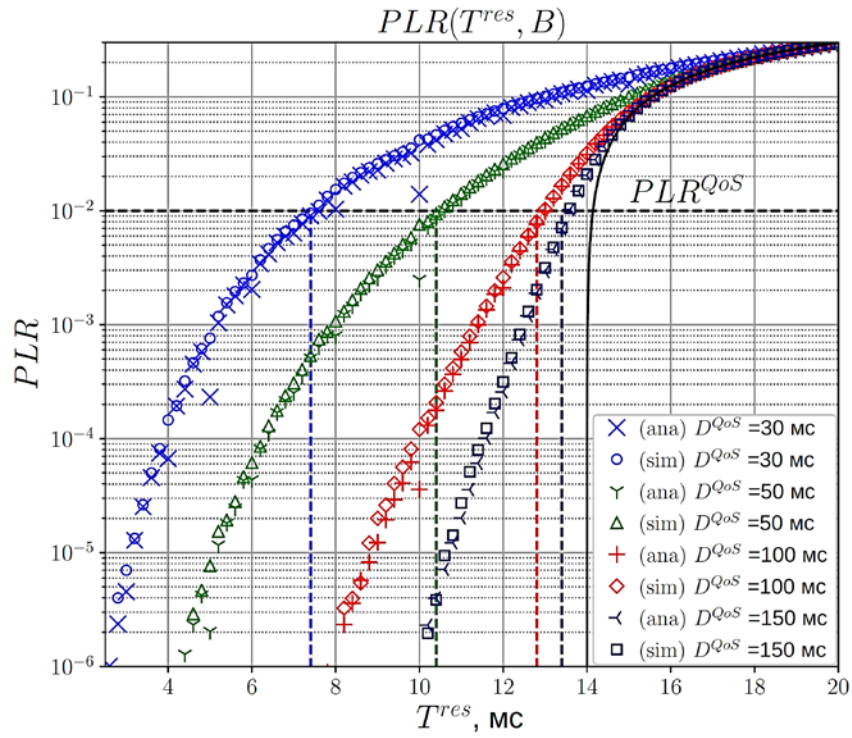


Рисунок 3.4 – Залежність частки втрачених PLR-пакетів від T^{res} при $T^{in} = 20$ мс, $q = 0,3$ і різних значень ξ .

Представлені результати були отримані з використанням як аналітичної, так і імітаційної моделей. У розробленій імітаційній моделі пакети можуть надходити в чергу не строго періодично, а з випадковим зсувом відповідно до нормального розподілу $N(\mu, \sigma)$: $\mu = 0$, $\sigma = 0,2T^{in}$. Цей випадковий зсув імітує поведінку реальних систем, в яких затримки на шляху від джерела до пункту призначення можуть бути різними.

У більшості моментів результати імітаційного та аналітичного моделювання добре узгоджуються один з одним, так що відносна похибка не перевищує 5%. Однак у деяких моментах аналітичні значення PLR значно знижуються. Ці падіння викликані дискретним характером системи, прийняттям аналітичної моделі та ігноруванням можливих випадкових зсувів у часі надходження пакетів у чергу. Зокрема, для $D^{QoS} = 30$ мс і $T^{res} = 9$ мс, $\tau = 1$ мс, а пакети можуть бути поставлені в чергу для $k = 0, 1, 2, \dots, 9$ слотів до найближчого зарезервованого інтервалу. Якщо $k \geq 3$, то за час знаходження пакета в черзі випадають 4 зарезервованих інтервалу часу. В інших випадках їх три. Навпаки, якщо $T^{res} = 10$ мс, то $\tau = T^{res}$.

У зв'язку з періодичними надходженнями, якщо хоча б один пакет надходить в чергу прямо перед деяким зарезервованим інтервалом всі інші пакети надходять в чергу точно перед відповідними зарезервованими інтервалами. Таким чином, існує чотири зарезервованих інтервали для кожного пакета протягом їх життя. Додатковий зарезервований інтервал зменшує значення PLR. Як правило, величина викиду PLR зростає від τ до локальних максимумів, коли T^{in} кратна T^{res} , тобто $\tau = T^{res}$ і $t^{res} = 1$. Викиди ПЛР також збільшуються зі зменшенням D^{QoS} , оскільки збільшується величина додаткових спроб передачі.

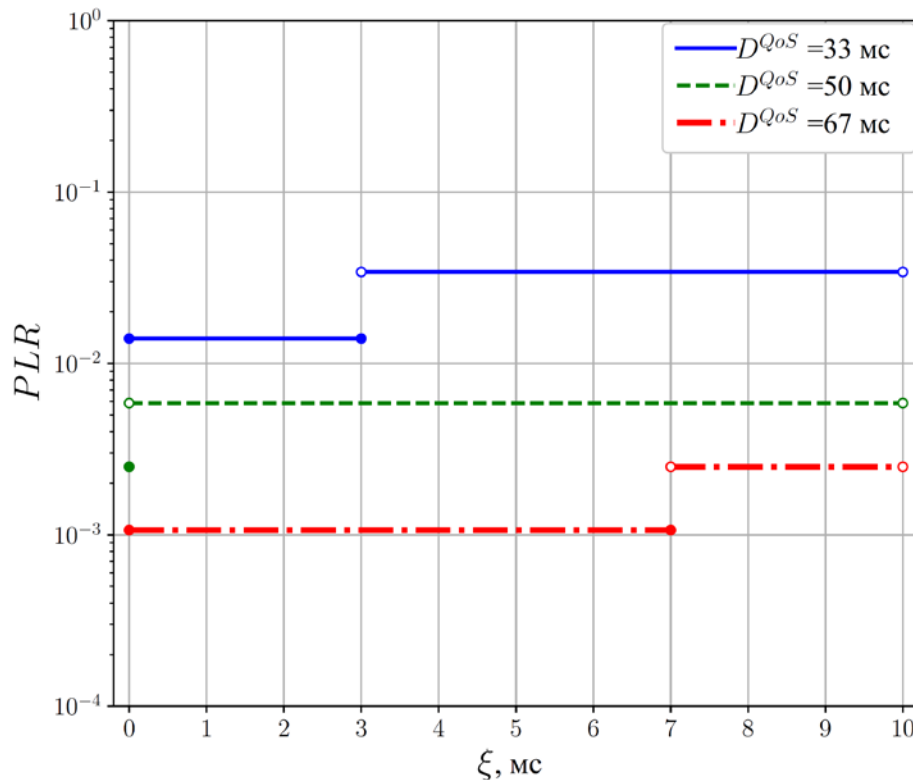


Рисунок 3.5 – Залежність частки втрачених пакетів PLR від ξ для $T^{\text{in}} = 20$ мс,
 $T^{\text{res}} = 10$ мс, $q = 0,3$

Відзначимо, що якщо пакети надходять в чергу строго періодично без випадкового зсуву, то результати симуляції збігаються з результатами аналітичного моделювання у всіх точках з високою точністю.

Раніше розглядався випадок $\xi = 0$. Давайте розглянемо інші значення ξ – інтервалу від моменту появи пакета до початку наступного слота. Значення ξ впливає на максимальну кількість слотів d , яку пакет може бути в черзі: $d = (D^{\text{QoS}} - \xi)/\tau$. Зміна ξ в напівінтервалі $[0, \tau)$ спричиняє стрибок значення PLR, що відбувається в точці $\gamma = (D^{\text{QoS}} \bmod \tau) \in [0; \tau)$. Значення частки втрати пакетів PLR^{high} для $\xi \in (\gamma; \tau)$, вище ніж значення PLR^{low} для $\xi \in [0; \gamma]$. Залежність PLR від ξ показана на рис. 3.5.

Насправді пакети не з'являються строго періодично, і значення ξ для різних пакетів різняться. Може статися так, що для одних пакетів $\xi \geq \gamma$, а для інших пакетів $\xi < \gamma$. Таким чином, частка втрачених пакетів в реальній системі знаходиться десь між PLR^{high} і PLR^{low} .

Описаний сплеск PLR впливає на вибір періоду резервування T^{res} . Зазвичай, враховуючи PLR^{QoS} , ви можете використовувати знайдену залежність $\text{PLR}(T^{\text{res}})$, щоб знайти максимальний період резервування $T^{\text{res}*}$, що $\text{PLR}(T^{\text{res}*}) \leq \text{PLR}^{\text{QoS}}$, тобто вимоги до якості обслуговування задоволені. Наприклад, для забезпечення PLR нижче 2% при $D^{\text{QoS}} = 30$ мс можна вибрати $T^{\text{res}*} = 10$ мс, як показано на рис. 2.7 (а). Однак, якщо відбувається досить великий випадковий зсув у надходженні пакетів, як описано вище, значення PLR при моделюванні в цій точці майже в 6 разів перевищує PLR, передбачене аналітичною моделлю, і, безумовно, перевищує бажане значення в 2%. Щоб впоратися з цією проблемою, найгіршим сценарієм $\xi(\gamma; \tau)$ при виборі періоду резервування. Функції $\text{PLR}(T^{\text{res}})$ для найгірших ситуацій показані на рис. 3.4 (б). Тепер замість падіння відбувається зростання PLR. Тим не менш, переоцінка може розглядати як хороший ефект, оскільки знижує ризик вибору такого T^{res} , при якому будуть порушені вимоги до якості обслуговування.

Варто зауважити, що якщо випадковий зсув невеликий, то можна розмістити застереження так, щоб $\xi \in [0; \gamma)$, це дозволить скоротити кількість споживаних ресурсів каналу при дотриманні вимог до якості обслуговування.

Примітно, що всі залежності $\text{PLR}(T^{\text{res}})$, що відповідають різним значенням D^{QoS} , сходяться до q , коли T^{res} наближається до T^{in} . Якщо $T^{\text{res}} = T^{\text{in}}$, то відбувається взаємне однозначне порівняння пакетів з зарезервованими часовими інтервалами. У цьому випадку коло врешті-решт досягає стану, коли кожен пакет має лише одну спробу передачі, і якщо вона зазнає невдачі, пакет відкидається. Це призводить до того, що частка втрачених пакетів дорівнює q .

Суцільні криві на рис. 3.4 показують нижню межу частки втрачених пакетів, що відповідає випадку ігнорування обмеження на час доставки пакетів (формально $D^{\text{QoS}} = \infty$). Щоб знайти цю нижню межу, зверніть увагу, що якщо немає обмеження на затримку, втрата пакетів не буде відбуватися тоді і тільки тоді, коли $I^{\text{in}} \leq I^{\text{out}}$, де $I^{\text{in}} = \frac{1}{T^{\text{in}}}$ це інтенсивність вхідного потоку, а $I_{\text{max}}^{\text{out}} = \frac{1-q}{T^{\text{res}}}$

максимально можлива інтенсивність вихідного потоку. При знятті ліміту часу

доставки пакета відсоток втрати пакета PLR_{∞} дорівнює

$$PLR_{\infty} = \max \left\{ 0, \frac{I^{in} - I_{\max}^{out}}{I^{in}} \right\} = \begin{cases} 0, & T^{res} \leq (1-q)T^{in} \\ 1 - \frac{(1-q)}{T^{res}}, & T^{res} > (1-q)T^{in} \end{cases}$$

Такі нижні межі можуть бути знайдені для впорядкованих і блочних передач пакетного потоку змінної інтенсивності. Єдина відмінність полягає у виразах для I^{in} і I_{\max}^{out} :

$$I^{in} = \frac{\sum_j j p_j^{in}}{T^{in}}, \quad I_{\max}^{out} = \frac{(1-q)B}{T^{res}}.$$

3.3.2 Порівняння ККД різних схем передачі

Порівняємо ефективність схем передачі, розглянутих у роботі. В якості критерію порівняння використаємо обсяг спожитих каналних ресурсів (3.1) при умові що вимоги до якості обслуговування виконані. Нехай $D_{order}^{res}(B)$, $D_{block}^{res}(B)$, $D_{ur}^{res}(B)$ зарезервовані інтервали, достатні для виконання B спроб з використанням послідовної передачі пакетів, безумовних повторних спроб передачі та блокової передачі відповідно. Для послідовної передачі:

$$D_{order}^{res}(B) = T_{PIFS} + B(T_{DATA} + T_{SIFS} + T_{ASK} + T_{SIFS}) - T_{SIFS}.$$

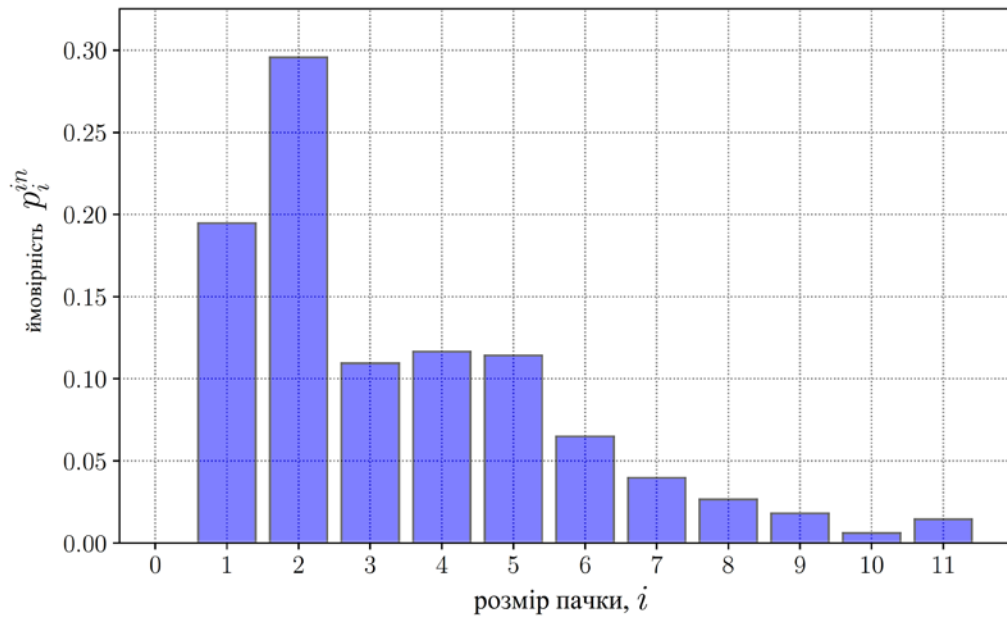


Рисунок 3.5 – Розподіл розміру пачок пакетів $\{p_i^{in}\}_{i=1}^M$

При цьому враховується, що передачі в різних зарезервованих інтервалах повинні бути відокремлені один від одного інтервалом не менше PIFS. Також відзначимо, що в окремому випадку $B = 1$ послідовна передача вироджується в індивідуальну передачу.

Для блочної передачі

$$D_{block}^{res}(B) = T_{PIFS} + B(T_{DATA} + T_{SIFS}) + T_{BAR} + T_{SIFS} + T_{B-ASK}.$$

Для передачі з безумовними повторними спробами

$$D_{ur}^{res}(B) = T_{PIFS} + B(T_{DATA} + T_{SIFS}).$$

Для заданого потоку пакетів нехай $C^*(PLR^{QoS})$ – мінімальна кількість ресурсів каналу, необхідна для задоволення вимог QoS:

$$C^*(PLR^{QoS}) = \min_{\substack{T^{res}, B: \\ PLR(T^{res}, B) \leq PLR^{QoS}}} C(T^{res}, B) \quad (3.11)$$

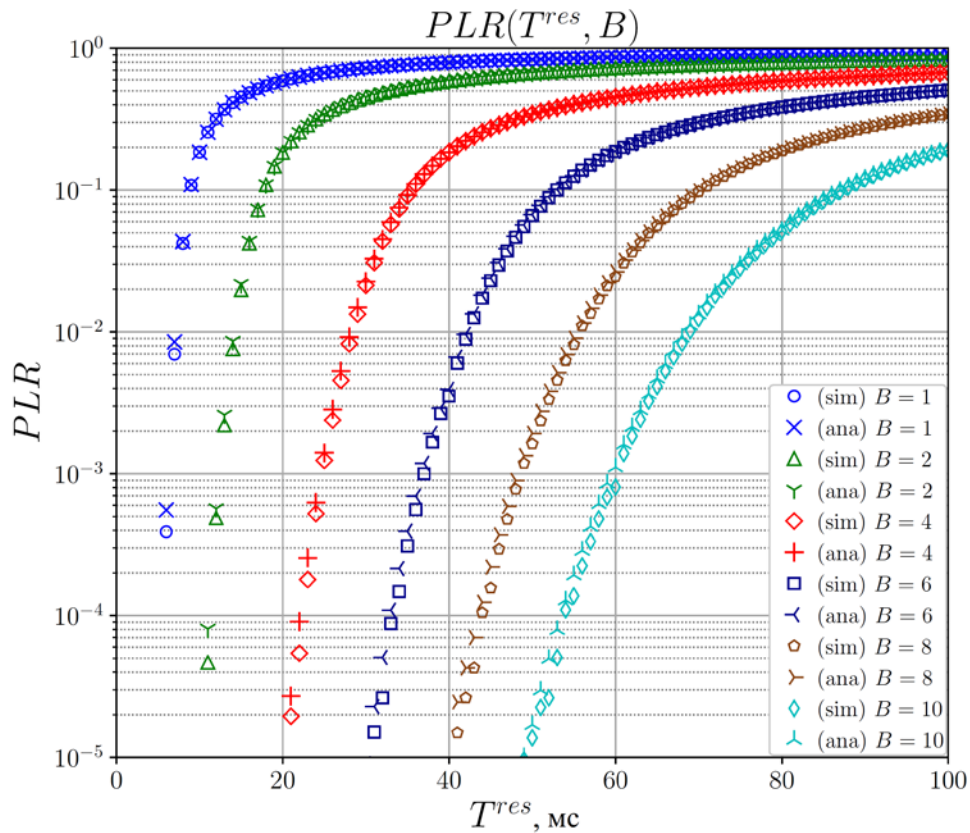


Рисунок 3.7 – Частка втрачених пакетів для потоку змінної інтенсивності при $D^{QoS} = 200$ мс при використанні послідовних передач з різними значеннями періоду резервування і тривалості зарезервованого інтервалу

Тепер знайдемо залежність $C^*(PLR^{QoS})$ для потоку змінної інтенсивності з $T^{in} = 40$ мс, $q = 0,3$ і розподіл розмірів пачок пакетів, показаний на рис. 3.6. Даний розподіл був отриманий експериментальним шляхом при передачі відеофрагмента за протоколом RTP і збору інформації про потік пакетів за допомогою програми `tcpdump`.

Для визначення $C^*(PLR^{QoS})$ спочатку знаходимо залежності $PLR(T^{res}, B)$ для різноманітних схем передачі даних. Зокрема, для впорядкованих і блокових передач ці залежності показані на рис. 3.7 і 3.8 відповідно.

Для того, щоб визначити D^{res} , потрібно враховувати відповідні параметри

протоколу фізичного рівня технології Wi-Fi. Скажімо, в числовому експерименті

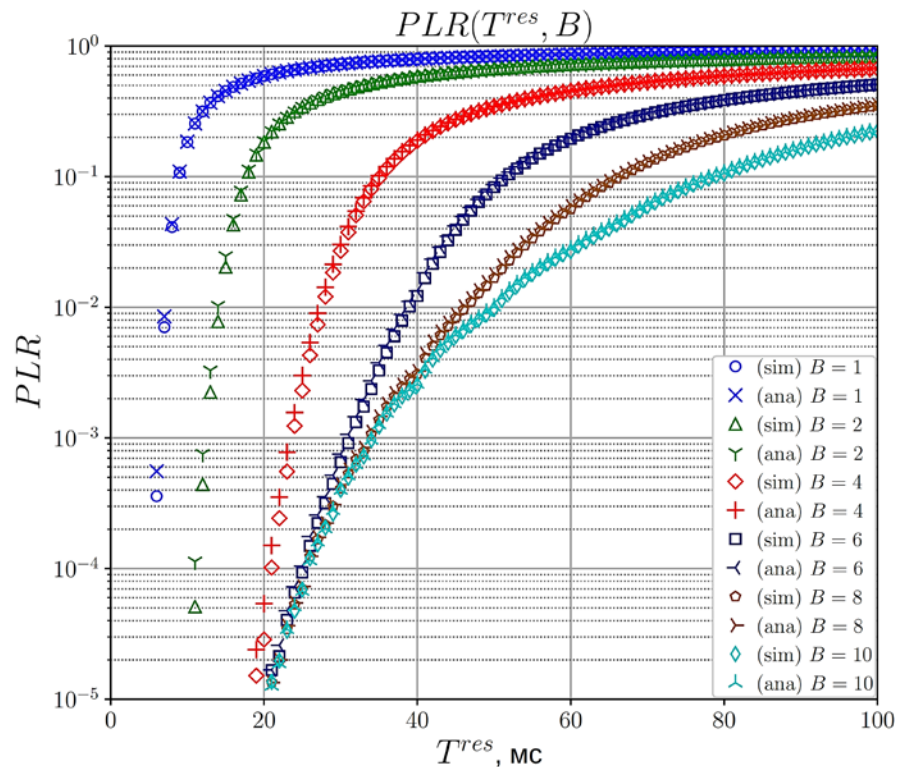


Рисунок 3.8 – Частка втрачених пакетів для потоку змінної інтенсивності при $D^{QoS} = 200$ мс при використанні блочної передачі з різними значеннями для періоду резервування і тривалості зарезервованого інтервалу

передача даних відбувається по каналу 160 МГц з використанням протоколу фізичного рівня, визначеного додатком IEEE 802.11ax до стандарту Wi-Fi. Кадри керування передаються зі швидкістю 30 Мбіт/с, а кадри розміром 1,5 КБ – зі швидкістю 576 Мбіт/с. Оскільки ми розглядаємо лише один потік, ми не беремо до уваги, наприклад, багатокористувацькі функції 11ax, наприклад OFDMA.

Рис. 3.9 показує мінімальне споживання каналного часу $C^*(PLR^{QoS})$, яке може бути досягнуте за допомогою різноманітних схем передачі для різних вимог QoS. Результати свідчать, що у всьому діапазоні типових вимог до PLR ($PLR^{QoS} = 10^{-4}$ до 10^{-2}) передача безумовними повторними спроби є найгіршою схемою передачі, тоді як блокова передача є найефективнішою.

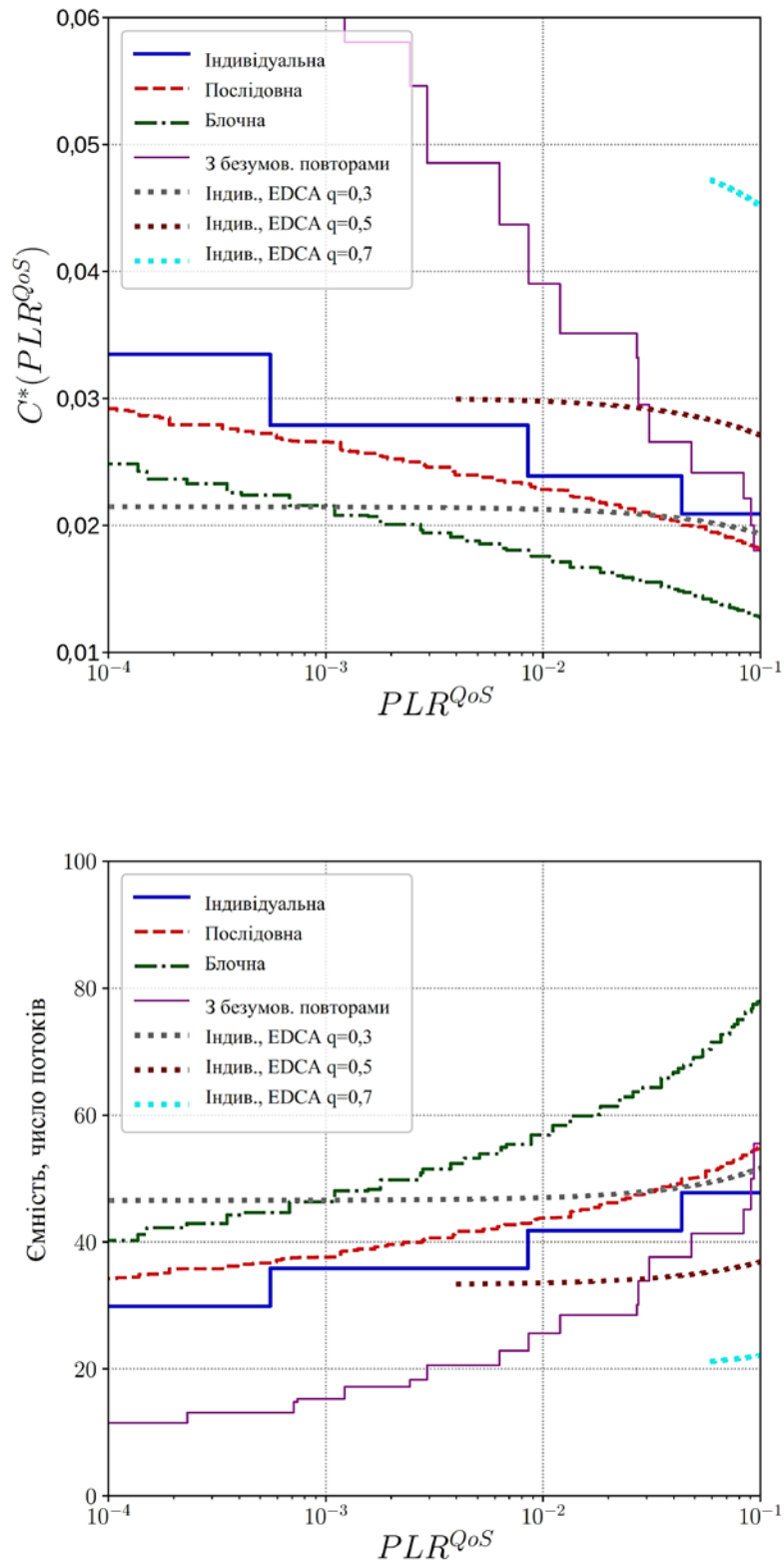


Рисунок 3.9 – Витрата ресурсів каналу (сумарний час зайнятості каналу C^*) і ємність мережі при використанні різних способів передачі потоку змінної інтенсивності

Це не дивно, тому, що при використанні безумовних спроб передачі кожен пакет передається рівно V разів, навіть якщо він доставлений з першої спроби. У

разі блокової передачі, кілька кадрів підтвердження АСК об'єднуються в один кадр BlockAck, зменшуючи накладні витрати, спричинені АСК порівняно з впорядкованою передачею. Менше споживання каналного часу на потік означає, що ємність мережі, тобто кількість потоків, які можуть обслуговуватися одночасно з необхідною якістю, вища, як показано на рис. 3.9.

Рис. 3.9 також показує споживання часу каналу та пропускну здатність мережі, які можуть бути досягнуті без резервувань, використовуючи основний для сучасних мереж Wi-Fi метод доступу EDCA і індивідуальні передачі. Результати для EDCA залежать від ймовірності невдалої спроби передачі за межами резервування. Очевидно, що якщо він дорівнює 0,3, тобто такий самий, як і в зарезервованих часових проміжках, резервування не підвищує надійність і є неефективним через високі накладні витрати, пов'язані з необхідністю встановлення резервування, а також резервуванням більшої кількості ресурсів каналу, ніж це фактично необхідно для задоволення вимог якості обслуговування. Іншими словами, резервування не повинно використовуватися, якщо немає завад і прихованих станцій, які призводять до високої ймовірності колізій при відсутності методів захисту передачі.

Більш реалістична ситуація полягає в тому, що резервування підвищує надійність. Таким чином, рівень помилок поза резервуванням набагато вищий, ніж у зарезервованих часових слотах. Навіть якщо $PER = 0,5$ за межами резервування та 0,3 всередині резервування, механізми резервування зменшують споживання часу каналу та збільшують пропускну здатність мережі.

При використанні тільки EDCA високе значення PER може не відповідати вимогам QoS. Наприклад, якщо кількість спроб передачі за замовчуванням обмежена вісьмома, при $q = 0,5$, неможливо досягти PLR менше 0,4%. Цей ефект показаний на рис. 3.9, де деякі криві «починаються» тільки при досить високих значеннях PLR^{QoS} .

3.4 Особливості практичного використання резервувань

У розділах 3.2 і 3.3 вибір періоду резервування вирішується виходячи з властивості одного потоку даних. При цьому вплив резервувань один на одного не враховуються. Однак в реальних мережах передається більше одного потоку, і неузгоджений вибір періоду резервування може призвести до значної фрагментації посилань і втрати ресурсів каналу.

Специфікації досліджуваних механізмів не накладають будь-яких обмежень на значення періоду резервування, припускаючи, що є можливість встановлювати резервування довільної періодичності. Однак це робить можливим те, що встановити резервування неможливо, навіть якщо є достатня кількість незарезервованого часу.

Наведемо спрощену ілюстрацію цієї ситуації на прикладі установки резервувань МССА. Проігноруємо наявність біконів і припустимо, що тривалість d всіх спроб пакетів даних в мережі однакова. Прийmemo тривалість спроби передачі пакета як одиницю часу $d = 1$. Нехай для DTIM-інтервал можна зробити лише 12 спроб передачі пакетів даних. Іншими словами, довжина інтервалу DTIM дорівнює 12. Як показано на рис. 3.10, якщо резервування періодичності $p_3 = 3$ вже встановлено, то резервування періодичності $p_4 = 4$ при будь-якому значенні зсуву f встановити неможливо, оскільки хоча б один інтервал нового резерву перетинається з інтервалом вже встановленого резервування.

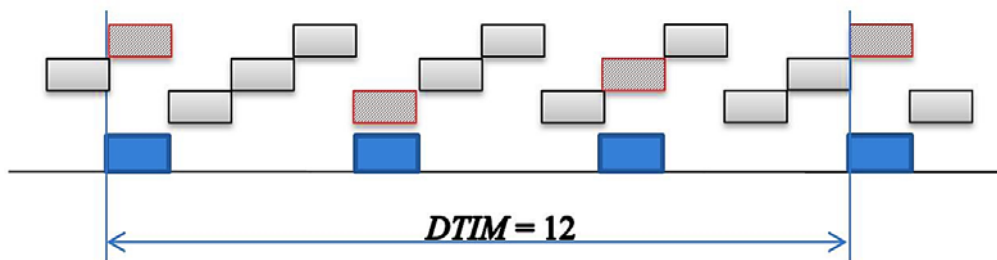


Рисунок 3.10 – Приклад неможливості встановлення резервування різної періодичності

Стандарт [11] не визначає, що робити в такій ситуації, і станція, яка не в змозі встановити резервування, може прийняти одне з наступних рішень:

- 1 станція відмовляє у встановленні резервування;
- 2 станція скасовує існуючі резервування для встановлення нового резервування.

3 станція розбиває резервування, яке потрібно встановити, на резервування з меншою періодичністю (до однієї періодичності) і намагається встановити їх.

Перший і другий способи не дозволяють досягти високої ємності мережі: в розглянутому на рис. 3.10 мережа може передавати тільки один потік. Більш того, другий спосіб не гарантує якість обслуговування потоків, які вже передаються по мережі. Третій спосіб призводить до фрагментації резервування і великих накладних витрат на управління ними. Таким чином, необхідний метод, що запобігає виникненню описаних ситуацій.

Створити такий метод можна, ввівши поняття базової періодичності p_0 і заборонивши резервування з частотою, яка не кратна базовій періодичності.

Слід зазначити, що для використання запропонованого підходу необхідно, щоб в мережі була встановлена єдина базова періодичність. Однак, завдяки розподіленому управлінню в Mesh-мережах Wi-Fi, кожна станція може вибирати це значення незалежно від інших станцій. Тому необхідно, щоб станція могла дізнатися значення p_0 обраної сусідніми станціями періодичності базовою і змінити її значення, наприклад, мінімальне значення зі значень сусідніх станцій і власне значення. Для цього кожна станція має розсилати інформацію про значення базової періодичності, наприклад, в біконах.

У разі, якщо інтенсивність трафіку перевищує p_0 пакетів на інтервал DTIM, станція може, наприклад, встановити одиничне резервування з періодичністю p_0 і розширеною тривалістю, резервування з кратним базовій або кілька резервувань з частотою p_0 , розділених приблизно рівними інтервалами.

Якщо Ви хочете налаштувати кілька резервувань з інтервалами, меншими за базову періодичність, ви повинні резервувати інтервали таким чином, щоб їх сукупність відповідала резервуванням з базовою періодичністю .

Крім того, передача інших періодичних пакетів, наприклад біконів, повинна бути спланована таким чином, щоб моменти передачі пакетів були встановлені на базову періодичність. Розглянемо це докладніше.

Бікони різних станцій (в mesh-мережах) або точок доступу (в інфраструктурних мережах) розміщуються випадковим чином відносно один одного. Маяки ТВТТ визначаються до встановлення резервування. Таким чином, вибір можливих інтервалів резервування підлягає обмеженням з боку вже позначених моментів відправки маяків, і розташування маяків. Кількість маяків між різними станціями впливає на кількість резервів, які можуть бути встановлені в мережі.

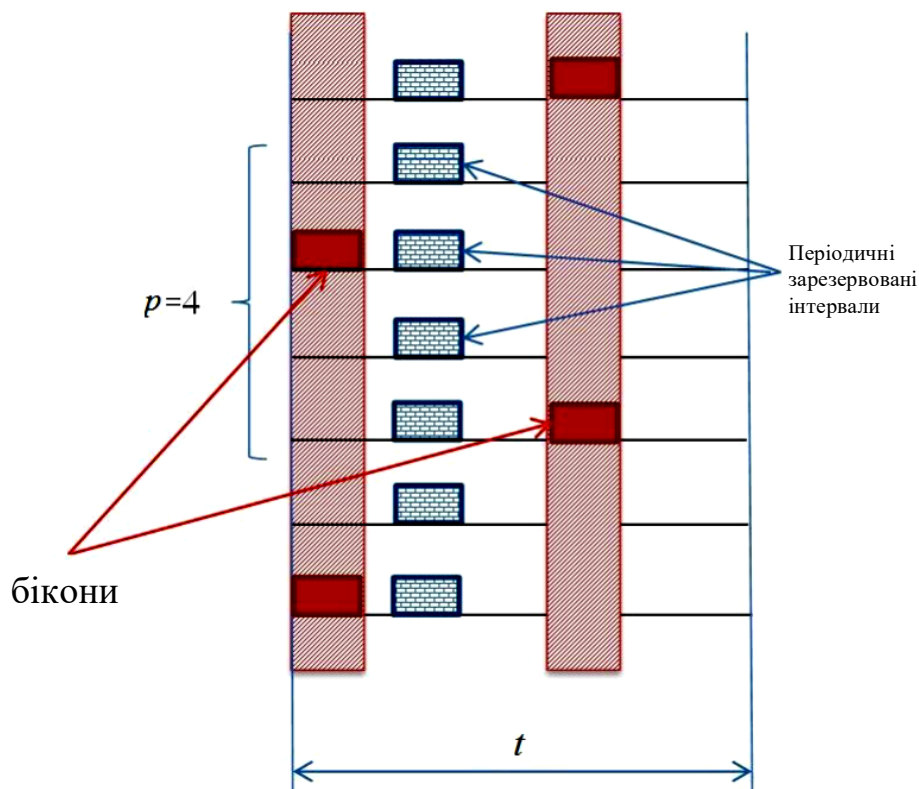


Рисунок 3.11 – Розбиття бікон-інтервалу на p періодів тривалості t

Давайте розглянемо, як хаотичне розміщення біконів впливає на кількість резерувань, які можуть бути встановлені механізмом МССА.

Далі, для простоти, будемо вважати, що довжини DTIM-інтервалу $DTIM_i$

бікон-інтервалу b рівні: $DTIM = b$.

Нехай для передачі даних користувача в мережі встановлюються резервування базової періодичності $p = p_0$, тобто інтервал між зарезервованими інтервалами одного резервування $t = \frac{b}{p}$. Розглянемо довільний бікон-інтервал b , розділимо його на інтервали t і зобразимо інтервали t один під іншим. То інтервали часу, які відносяться до одного і того ж, резервування, розміщені строго один під одним (рис. 3.14)

За допомогою бікона часові інтервали «під ним» і «над ним» не можуть бути використані для передачі даних користувача за допомогою детермінованого механізму доступу.

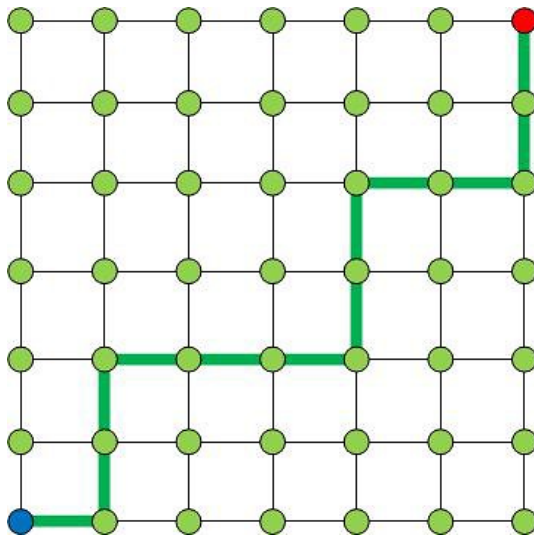


Рисунок 3.12 – Приклад маршруту потоку в мережі з ґратчастою топологією

Очевидно, що найефективнішим способом розміщення маяків є розміщення їх в одному стовпчику «один під одним». Назвемо таке розташування біконів регулярним. Відзначимо, що максимальна кількість біконів, які можна поставити один на одного, дорівнює p , а якщо біконів більше, то їх можна розмістити в декількох стовпчиках.

Проілюструємо, як базова частота впливає на ємність мережі, тобто кількість потоків, які можуть одночасно передаватися в мережі при виконанні вимог QoS, за допомогою імітаційного моделювання в середовищі ns-3.

Розглянемо мережу Wi-Fi з ґратчастою топологією 7×7 . Всі передачі ведуться зі швидкістю 6 Мбіт/с. Бікон-інтервал становить 1 с. Очікувана тривалість бікона - 480 μ s. Значення інших параметрів протоколу канального рівня встановлюються згідно стандарту. При моделюванні використовувалася двопроточна модель поширення сигналу без випадкової компоненти загасання.

Запустимо 16 потоків голосових даних, згенерованих кодеком G.729 від станції А до станції Б.

Ми виміряємо ємність мережі в кількості встановлених резервувань і дослідимо залежність ємності мережі в такому сценарії від щільності мережі, тобто кількості станцій на квадрат радіуса чутності. З щільністю «1» станції

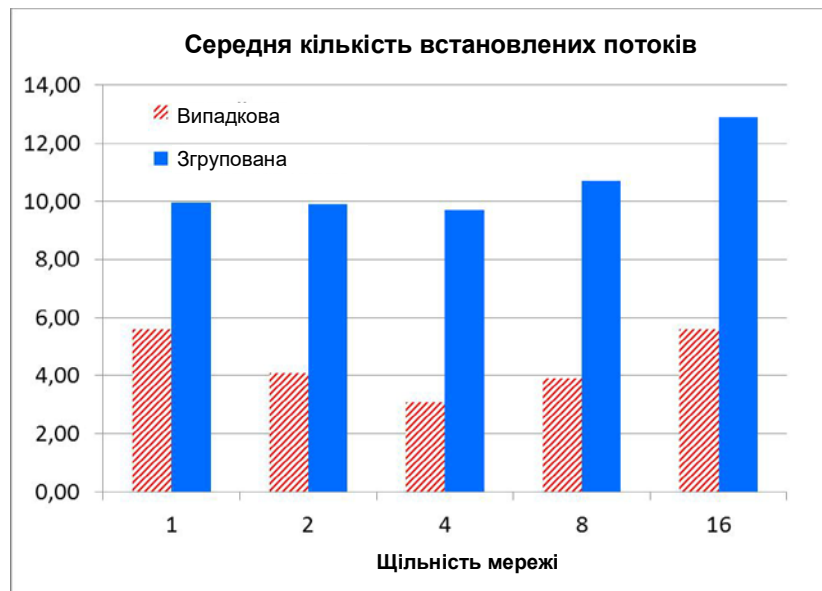


Рисунок 3.13 – Пропускна здатність мережі при різній щільності станції

можуть передавати тільки по ребрах сітки, тому кожна станція має не більше 4 сусідів. При щільності «2» станції, розташовані по діагоналях, також знаходяться в зоні радіоприйому один одного, тобто максимальна кількість сусідів збільшується до 8 і так далі.

Залежність ємності мережі від щільності станцій при використанні різних механізмів розміщення біконів відносно один одного показана на рис. 3.13. Число прогонів імітаційної моделі в кожному експерименті підбиралося таким

чином, щоб відносна похибка результатів не перевищувала 5%. Зі збільшенням щільності, з одного боку, більше пристроїв починають ділити канал, а з іншого - маршрути стають коротшими. Ці ефекти впливають на пропускну здатність мережі різнонаправлено, через що вона не монотонно залежить від щільності мережі. Однак, як показують результати, незалежно від щільності мережі, використання регулярного розміщення біконів дозволяє збільшити ємність мережі приблизно в 2 рази в порівнянні з методом розміщення біконів, що використовується в стандарті.

3.5 Розробка методу моделювання для інших сценаріїв

Запропонований метод призначений для визначення параметрів періодичного резервування і вибору схеми передачі даних, що дозволяє мінімізувати кількість споживаних ресурсів каналу при передачі мультимедійного потоку із заданими вимогами до якості обслуговування між двома Wi-Fi пристроями, може бути легко поширена на інші сценарії передачі даних, що і було зроблено.

3.5.1 Використання розробленого методу в мережах IEEE 802.11ad/ay

Особливістю періодичного резервування, що використовується в мережах IEEE 802.11ad і IEEE 802.11ay, є те, що відстань між першим зарезервованим інтервалом в бікон-інтервалі і попереднім зарезервованим інтервалом не дорівнює відстані між парою зарезервованих інтервалів в межах одного бікон-інтервалу. При цьому структура бікон-інтервалу, тобто положення зарезервованих інтервалів в межах одного бікон-інтервалу, не змінюється протягом декількох інтервалів. Для того, щоб врахувати цей квазіперіодичний характер зарезервованих інтервалів, запропоновано задати множину T_i , $i = 0, \dots, N - 1$ проміжків часу між початками суміжних зарезервованих інтервалів, кожен з яких має тривалість R , рис. 3.14.

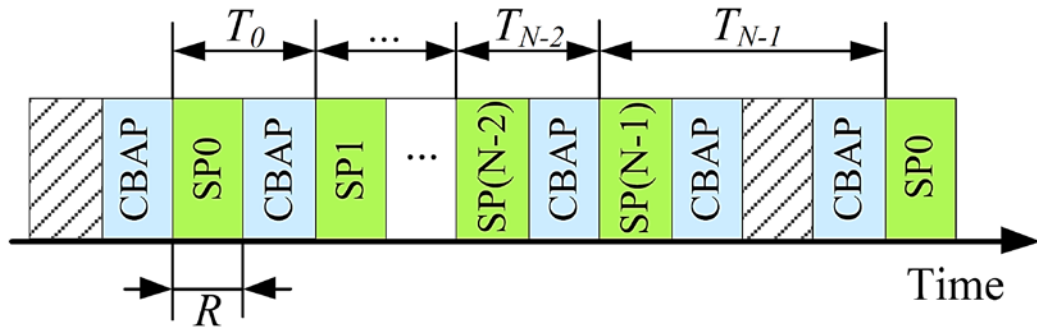


Рисунок 3.14 – Квазіперіодичні резервування в IEEE 802.11ad/ay

Процес передачі потоку постійної інтенсивності з використанням квазіперіодичного резервування моделюється у вигляді кола Маркова з дискретним часом. Як і раніше, для спрощення опису моделі вводиться слот τ , і тут його тривалість дорівнює найбільшому спільному дільнику інтервалів $T^{in}, T_0^{res}, \dots, T_{N-1}^{res}$. Таким чином, період приходу пакетів в чергу T^{in} і інтервали $\{T_i^{res}\}$ між зарезервованими інтервалами можна виразити цілим числом слотів:

$$t^{in} = \frac{T^{in}}{\tau}, t_n^{res} = \frac{T_n^{res}}{\tau}, t^{in}, t_n^{res} \in \mathbb{N}, n \in \overline{0, N-1}. \quad (3.12)$$

Розділимо неперервну шкалу часу на слоти так, що початок кожного інтервалу SP збігся з початком слота.

Крім того, сумістимо прихід кожного пакета з початком слота (рис. 3.15). Якщо цього не вдасться зробити, ми віртуально перемістимо кожний момент надходження пакетів на початок наступного слота і віднімемо цей зсув від часу життя вхідного пакета.

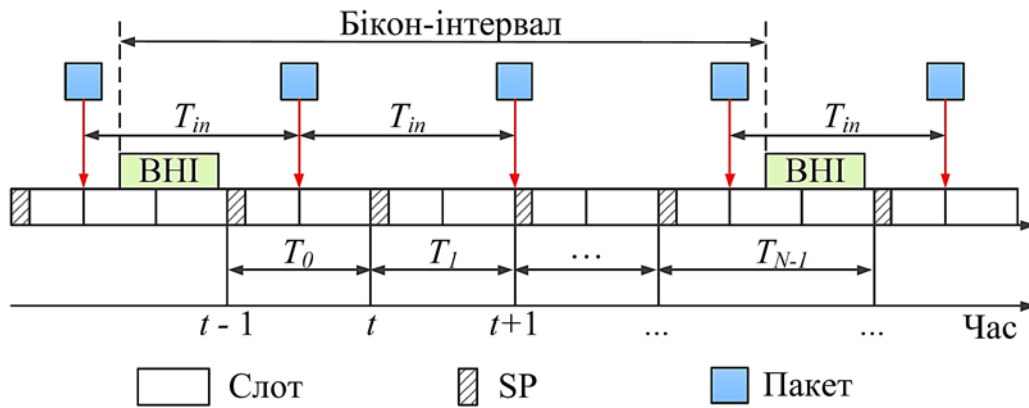


Рисунок 3.15 – Взаємне розташування зарезервованих інтервалів і моментів надходження пакетів.

Пронумеруємо інтервали SP в межах кожного бікон-інтервалу, як показано на рис. 3.15.

Розглянемо коло Маркова в моменти $t, t + 1, \dots$, які відповідають початкам інтервалів SP.

Опишемо стани кола Маркова. Для цього, як і в розділі 2.2, вводимо вік пакета a , який може приймати як позитивні, так і негативні значення, і нуль. У момент часу t стан кола визначається парою цілих значень $(a(t), n(t))$, де $n(t)$ - порядковий номер даного SP всередині бікон-інтервалу. Знання $n(t)$ необхідно для визначення фактичної тривалості переходу $(t, t + 1)$.

Найменше можливе значення a дорівнює $\min\{t_n^{res}\} - t^{in}$. Ця величина досягається в певний момент часу $t + 1$, якщо (а) тривалість інтервалу часу між t і $t + 1$ дорівнює $\min\{t_n^{res}\}$, і (б) пакет надходить у порожню чергу на t і успішно передається в найближчому SP.

Щоб найстаріший пакет не був відразу відкинутий в даний момент часу t , його вік a не повинен перевищувати D^{QoS} . Тому $a\tau \leq D^{QoS}$ і максимальне значення

$$a \text{ дорівнює } d = \left\lfloor \frac{D^{QoS}}{\tau} \right\rfloor.$$

Припустимо, що система знаходиться в стані (a, n) в момент часу t .

Опишемо можливі переходи и їх імовірності. Припустимо $t_n^{res} \leq d$ для всіх $n = 0, \dots, N - 1$.

- $h < 0$. У момент часу t черга порожня. До моменту часу $t + 1$, час до прибуття наступного пакета скорочується на t^{res} . Таким чином система переходить в стан $(a + t_n^{res}, (n + 1) \bmod N)$ з імовірністю 1.

- $0 \leq a \leq d - t^{res}$. Черга не порожня і найстарший (головний) пакет не застарівають до моменту часу $t + 1$, оскільки $a + t_n^{res} \leq d$. Цей пакет передається в поточному SP:

- З ймовірністю $1-p$ передача не успішна. Потім найстарший пакет очікує момент часу $t + 1$ для повторної передачі. До моменту $t + 1$ його вік збільшується на t_n^{res} і система переходить в стан $(a + t_n^{res}, (n + 1) \bmod N)$.

- З ймовірністю p найстарший пакет успішно переданий в даному SP. Таким чином, другий пакет в черзі стає головним. Його вік на даний момент становить $a - t^{in}$, і до певного моменту часу $t + 1$ він збільшується на t_n^{res} . Таким чином, система перейде в стан $(a + t_n^{res} - t^{in}, (n + 1) \bmod N)$.

- $a > d - t_n^{res}$. Найстарший пакет застаріє до моменту часу $t + 1$ і безумовно покидає чергу. Якщо t_n^{res} достатньо великий, пакети, наступні за найстарішими, можуть бути відкинуті до моменту часу $t+1$ через перевищення допустимої затримки. Кількість пачок, які потрібно викинути визначається

виразом $m_{a,n} = \left\lceil \frac{a + t_n^{res} - t^{in} - d}{t^{in}} \right\rceil$, якщо $t_n^{res} > t^{in}$ і $m_{a,n} = 0$, якщо $t_n^{res} \leq t^{in}$. Отже

система переходить в стан $(a + t_n^{res} - t^{in} - m_{a,n} \cdot t^{in}, (n + 1) \bmod N)$ з ймовірністю 1.

Склавши матрицю перехідних ймовірностей, можна отримати стаціонарні ймовірності $\pi_{a,n}$ станів кола Маркова і визначити частку втрачених пакетів.

Ця модель поширена на випадок потоку змінної інтенсивності, рис. 3.15.

Для цього в опис системи додано ще один параметр $m(t)$, який вказує на кількість пакетів у головній пачці черги, якщо черга не порожня, або кількість пакетів у найближчій пачці, яка надійде до черги, якщо черга порожня. Таким

чином, стан системи описується триплетом $\{a(t), m(t), n(t)\}$.

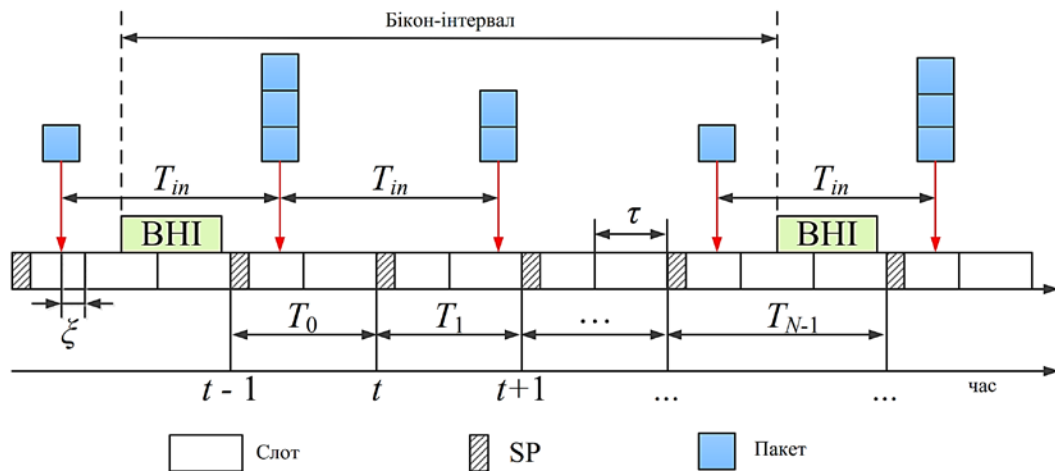


Рисунок 3.15 – Взаємне розташування зарезервованих інтервалів і моментів надходження пачок пакетів

3.5.2 Використання розробленого методу для аналізу обслуговування декількох потоків

Обговорюється сценарій, при якому для передачі N мультимедійних потоків від точки доступу до різних приймачів використовується одне резервування, рис.3.16. Передбачається, що період надходження кожного потоку однаковий і дорівнює T_{in} , а моменти приходу пачок різних потоків зміщені відносно один одного. Це дозволяє пронумерувати потоки в порядку надходження їх пачок. Нехай Z_n – інтервал часу між моментом надходження

пачок потоку n , $n \in \overline{0, N-1}$ і наступного потоку. Відмітимо, що $\sum_{n=0}^{N-1} Z_n = T_{in}$.

Кількість пакетів в пакеті визначається дискретним розподілом. Нехай p_n^m , $m \in \overline{1, M}$, буде розподіл розміру пачок потоку n , де M – максимальний розмір

пачки, $\forall n : \sum_{m=1}^M p_n^m = 1$. Пропонується, що для потоку n передбачається, що

ймовірність невдалої спроби передачі дорівнює q_n . Якщо пакет не доставлений за час D^{QoS} , він відкидається.

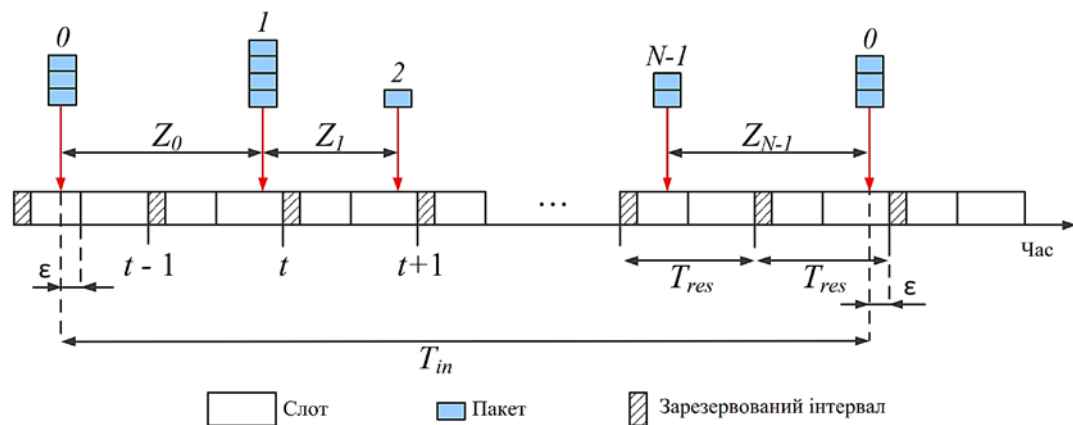


Рисунок 3.16 – Взаємне розташування зарезервованих інтервалів і моментів надходження пачок пакетів різних потоків.

Для передачі потоків точка доступу резервує періодичну серію часових інтервалів з періодом T_{res} і тривалістю, достатньою для передачі як пакета, так і підтвердження.

Для знаходження частки втрачених пакетів будується коло Маркова, яка є аналогічною до описаної в розділі 3.2.3, в якому стан описується трьома числами: $(a(t), n(t), m(t))$, де $n(t)$ - номер потоку, пакет якого знаходиться на чолі черги.

У роботі показано, що використання спільного резервування для декількох потоків дозволяє задовольнити вимоги до якості обслуговування при меншій витраті ресурсів каналу в порівнянні з одиничними резервуваннями.

3.5.3 Використання розробленого методу за наявності корельованих завад

При розробці моделі в розділі 3.2.5 передбачалося, що помилки передачі різних пакетів в межах одного і того ж зарезервованого інтервалу виникають незалежно один від одного. Однак, оскільки час між передачами цих пакетів дуже малий, то не виключено, що не слід нехтувати взаємозалежністю помилок передачі. В цьому випадку можна розглянути модель помилок, в якій ймовірність відмови передачі пакета залежить від кількості послідовних невдалих спроб

передачі в один і той же зарезервованій інтервал, що безпосередньо передуює даній передачі. Якщо передачі поточного пакета передувало l невдалих передач у блоці, то ймовірність відмови розглянутого пакета дорівнює q_l ($l \in \{0, \dots, B - 1\}$).

У роботі показано, як враховувати такі корельовані помилки при передачі даних при моделюванні блокової передачі мультимедійного потоку і виборі параметрів резервування.

Суть запропонованих змін полягає в тому, що якщо при розрахунку ймовірності скидання пакетів $P_{dis}(s, \alpha)$ було прийнято, що ймовірність P_{fail} того, що перші r передачі були невдалими, дорівнює q^r , то тепер потрібно враховувати позиції пакетів в межах зарезервованого інтервалу. Зокрема, величина $P_{dis}(s, \alpha)$ визначається наступним чином.

Нехай $P_{wait}(k, i | s)$ – ймовірність того, що при попаданні в чергу довжини s пакет буде чекати своєї першої передачі рівно через k інтервалів ($k \geq 0$), і тільки в $(k + 1)$ -му він потрапить в блок для передачі на позицію i , тобто буде переданий i -му в рахунку інтервалі ($i \in \{1, \dots, B\}$). Нехай $r(\alpha)$ – кількість зарезервованих інтервалів протягом усього терміну дії пакета, що надходить після α слотів опісля останнього зарезервованого інтервалу.

Ймовірність $P_{dis}(s, \alpha)$ того, що пакет не буде успішно переданий, дорівнює сумі ймовірностей наступних двох несумісних подій:

Пакет, потрапивши в чергу, не потрапив в переданий блок i , отже, ніколи не передавався. Ймовірність цієї події становить

$$1 - \sum_{k=0}^{r(\alpha)-1} \sum_{i=1}^B P_{wait}(k, i | s);$$

Пакет потрапляв у чергу і потрапляв у переданий блок, але так і не був успішно переданий протягом решти життя. Ймовірність цієї події становить

$$\sum_{k=0}^{r(\alpha)-1} \sum_{i=1}^B P_{wait}(k, i|s) P_{fail}(r(\alpha) - k|i),$$

де $P_{fail}(n|i)$ – ймовірність того, що пакет, першим потрапивши в позицію i блоку, що передається, не буде переданий протягом n зарезервованих інтервалів (при n спробах передачі).

В результаті ймовірність $P_{dis}(s, \alpha)$ обчислюється наступним чином:

$$P_{dis}(s, \alpha) = 1 - \sum_{k=0}^{r(\alpha)-1} \sum_{i=1}^B P_{wait}(k, i|s) (1 - P_{fail}(r(\alpha) - k|i)), \quad (3.13)$$

а щоб його визначити, потрібно знайти $r(\alpha)$, $P_{wait}(k, i|s)$ і $P_{fail}(l|i)$.

Знайдемо $r(\alpha)$.

Нехай $r_0 = \lfloor D^{QoS} / T^{res} \rfloor$. Час життя пакета D^{QoS} може бути як r_0 , так і $r_0 + 1$ зарезервованих інтервалів. Точна кількість інтервалів залежить від того, коли пакет надійшов в чергу. Позначимо $\delta = D^{QoS} \bmod T^{res}$, $0 \leq \delta < T^{res}$. Якщо пакет надійшов за час менше або дорівнює δ до початку найближчого зарезервованого інтервалу, то він може опинитися в черзі впродовж $r_0 + 1$ зарезервованих інтервалів. В іншому випадку на один інтервал менше.

Нехай пакет надійде α ($1 \leq \alpha \leq t^{res}$) слотів після початку попереднього зарезервованого інтервалу. Тоді час до початку наступного інтервалу дорівнює $T^{res} - (\alpha\tau - \xi)$. Таким чином,

$$r(\alpha) = \begin{cases} r_0, & \text{якщо } \alpha \in \{1, \dots, d-1\}, \\ r_0 + 1, & \text{якщо } \alpha \in \{d, \dots, t^{res}\}, \end{cases}$$

$$\text{де } d = \left\lceil \frac{T^{res} + \xi - \delta}{\tau} \right\rceil.$$

Знайдем $P_{wait}(k, i|v)$.

Якщо $s < B$, то $P_{\text{wait}}(k, i | s) = 1$ з $i = s + 1$ і $k = 0$, а $P_{\text{wait}}(k, i | s) = 0$ у всіх інших випадках. Якщо $s \geq B$, то ймовірності $P_{\text{wait}}(k, i | s)$ Можна знайти, за допомогою рекурентного співвідношення

$$P_{\text{wait}}(k, i | s) = \sum_{b=0}^B P_{\text{tx}}(s | b) P_{\text{wait}}(k-1, i | s-b),$$

де $P_{\text{tx}}(s | b)$ – ймовірність того, що з b пакетів блоку s пакетів були успішно прийняті.

Знайдемо $P_{\text{tx}}(s | b)$ і $P_{\text{fail}}(n | i)$.

Розглянемо процес передачі пакетів всередині зарезервованого інтерфейсу. Процес буде спостерігатися в моменти між передачами пакетів, і процес в ці моменти буде описуватися єдиним параметром ℓ - числом помилкових пакетів, переданих поспіль, що безпосередньо передують поточному моменту спостереження. Після передачі $b \in \{0, \dots, B\}$ процес може перебувати в одному зі станів $\ell \in \{0, \dots, b\}$. Позначимо через $\Lambda(\ell, u | w)$ ймовірність того, що після w перших передач процес перейшов в стан ℓ , і в цьому випадку u з w пакетів ($1 \leq u \leq w$) були передані невдало. Ймовірності $P_{\text{tx}}(s | b)$ можна виразити через ймовірності $\Lambda(\ell, u | w)$ наступним чином:

$$P_{\text{tx}}(s | b) = \sum_{\ell=0}^{b-s} \Lambda(\ell, b-s | b).$$

Щоб знайти ймовірності $P_{\text{fail}}(n | i)$, розглянемо ще один процес, а саме процес зміни положення i пакета в переданому блоці з плином часу. Формально припустимо, що при передачі пакета номер його позиції в блоці стає рівним нулю і більше не змінюється, тобто перебуваючи в нульовому стані, процес залишається в ньому. Зі стану $i \in \{1, \dots, B\}$ за один зарезервований інтервал можливі такі переходи:

1. Пакет успішно передається і процес переходить в стан $j = 0$.

Ймовірність такого переходу дорівнює $\sum_{u=0}^{i-1} \Lambda(0, u | i)$;

2. Пакет не був успішно відправлений, і процес переходить в один зі станів $j \in \{1, \dots, i\}$. Імовірність такого переходу дорівнює $\sum_{l=1}^j \Lambda(l, j | i)$.

Нехай U – матриця перехідних ймовірностей даного процесу. Розглянемо степені цієї матриці: $U^0 = E$ (одична матриця), U, U^2, \dots, U^B . Елемент $U_{i,j}^n$ матриці U^n – це ймовірність переходу пакету від позиції i в позицію j за n спроб передачі. Тоді U^n – ймовірність того, що пакет буде переданий за n або менше спроб передач, а ймовірність $P_{fail}(n|i)$ у той же час вона дорівнює

$$P_{fail}(n|i) = 1 - U_{i,0}^n.$$

Таким чином, залишається знайти ймовірності $\Lambda(\ell, u | w)$. Ці ймовірності можна знайти, використовуючи рекурентне співвідношення.

$$\Lambda(\ell, u | w) = \begin{cases} \Lambda(\ell - 1, u - 1 | w - 1) q_{\ell-1}, & \text{якщо } \ell \geq 1, w > 0, \\ \sum_{k=1}^u \Lambda(k, u | w - 1) (1 - q_k), & \text{якщо } \ell = 0, w > 0, \end{cases}$$

з наступними початковими умовами: $\Lambda(\ell, u | 0) = 1$ при $\ell = u = 0$ і $\Lambda(\ell, u | 0) = 0$ у всіх інших випадках.

Шляхом підстановки знайдених ймовірностей у вирази для $P_{tx}(s|b)$ і $P_{fail}(n|i)$, можна отримати значення ймовірності $P_{dis}(s, \alpha)$.

3.6 Висновки до третього розділу

У цьому розділі розроблена методологію математичного моделювання передачі чутливих до затримки поточкових даних в умовах завад з використанням періодичних резервувань. Представлені моделі дозволяють оцінити частку втрат пакетів при використанні різних схем передачі даних сучасних мереж Wi-Fi з

використанням механізмів ТХОР, різні методи агрегації пакетів, блокове підтвердження. Показано, як за допомогою розроблених моделей визначаються параметри резервування та схеми передачі даних, що дозволяють задовольнити вимоги до якості обслуговування мультимедійних потоків при мінімальних витратах каналних ресурсів. Проведено масштабне порівняння результатів аналітичного і імітаційного моделювання, за допомогою якого показано, що припущення, зроблені при розробці моделей, дещо погіршують їх точність. Розглянуті питання практичного використання періодичних резервувань в мережах Wi-Fi, в результаті чого формулюється рекомендація з використання періодичності, кратній заданій.

Отримані результати можуть бути використані в мережах Wi-Fi, побудованих на основі різних доповнень до стандарту. Крім того, окремо розглядаються питання поширення розробленого методу моделювання на випадки квазіперіодичного резервування, передачі декількох мультимедійних потоків в одному резервуванні, обліку корельованих завад та інших випадків.

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 «Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій ETHERNET та WIFI» 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 «Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій ETHERNET та WIFI» 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	0	48
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	44	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		47,3		

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	62	61
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	61,0		

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 [28]:

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

де $k_{нов}$, $k_{теор}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{нов} = 47,3$, $k_{теор} = 61,0$ балів;
 $0,6$ та $0,4$ – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 47,3 + 0,4 \cdot 61,00 = 52,80 \text{ балів.}$$

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 «Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій ETHERNET та WIFI», даний рівень становить 52,80 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 «Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій ETHERNET та WIFI», 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 [28]:

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

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.

$$Z_o = 16850,00 \cdot 32 / 21 = 25676,19 \text{ грн.}$$

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	16850,00	802,38	32	25676,19
Ст. науковий співробітник	15600,00	742,86	21	15600,00
Інженер-розробник телекомунікаційних мереж 1-ї категорії	14600,00	695,24	18	12514,29
Технік 1-ї категорії	8100,00	385,71	16	6171,43
Всього				59961,90

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій ETHERNET та WIFI» 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) [28];

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.

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (21 \cdot 8) = 59,22 \text{ грн.}$$

$$Z_{p1} = 59,22 \cdot 5,40 = 319,81 \text{ грн.}$$

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
Підготовка робочого місця розробника телекомунікаційних мереж	5,40	2	1,10	59,22	319,81
Інсталяція програмного забезпечення середовища розробки і моделювання	7,30	3	1,35	72,68	530,59
Компіляція програмних блоків моделювання	5,80	4	1,50	80,76	468,40
Монтаж елементів мережі ETHERNET та WIFI	10,50	5	1,70	91,53	961,03
Технічне забезпечення протікання експериментів	16,00	3	1,35	72,68	1162,93
Всього					3442,75

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

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

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

$$Z_{\text{дод}} = (59961,90 + 3442,75) \cdot 12 / 100\% = 7608,56 \text{ грн.}$$

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:

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

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

$$Z_n = (59961,90 + 3442,75 + 7608,56) \cdot 22 / 100\% = 15622,91 \text{ грн.}$$

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 «Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій ETHERNET та WIFI».

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

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

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

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.

$$M_1 = 3,0 \cdot 206,00 \cdot 1,02 - 0,0 \cdot 0,0 = 630,36 \text{ грн.}$$

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 офісний А4 білий (80%)	206,00	3,0	0,0	0,0	630,36
Диск оптичний (CD-R)	27,00	2,0	0,0	0,0	55,08
Органайзер офісний ВОХ-16А	198,00	4,0	0,0	0,0	807,84
Канцелярське приладдя	216,00	4,0	0,0	0,0	881,28
Тонер HP-26 (для заправки картриджа)	218,00	2,0	0,0	0,0	444,72
FLASH-пам'ять	219,00	2,0	0,0	0,0	446,76
Всього					3266,04

4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій ETHERNET та WIFI», 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, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_e = 1 \cdot 4050,00 \cdot 1,01 = 4090,50 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
IP телефон Escene ES410PE	1	4050,00	4090,50
Маршрутизатор TP-LINK Archer AX73	1	4999,00	5048,99
Маршрутизатор Asus TUF Gaming AX6000	1	6709,00	6776,09
Всього			15915,58

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:

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

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

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

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

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 3899,00 \cdot 1 \cdot 1,02 = 3976,98 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання спекустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Роутер	1	3899,00	3976,98
Термінальне обладнання	1	8450,00	8619,00
Всього			12595,98

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:

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

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

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

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

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 8199,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 8608,95 \text{ грн.}$$

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
Пакет прикладного програмного забезпечення обробки даних	1	8199,00	8608,95
Всього			8608,95

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:

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

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

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

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

$$A_{обл} = (44299,00 \cdot 2) / (2 \cdot 12) = 3691,58 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.10.

4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

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

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

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

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

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

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

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 аналітичної системи обробки даних	44299,00	2	2	3691,58
Персональний комп'ютер	17999,00	2	2	1499,92
Спеціалізоване робоче місце дослідника мереж	7999,00	5	2	266,63
Пристрій виводу текстової інформації	6500,00	4	2	270,83
Оргтехніка	8650,00	5	2	288,33
Приміщення лабораторії досліджень	415000,00	25	2	2766,67
ОС Windows 11	6510,00	2	2	542,50
Прикладний пакет Microsoft Office 2019	6490,00	2	2	540,83
Всього				9867,30

$$B_e = 0,36 \cdot 240,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 648,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Електронний комплекс аналітичної системи обробки даних	0,36	240,0	648,00
Персональний комп'ютер	0,25	240,0	450,00
Спеціалізоване робоче місце дослідника мереж	0,10	240,0	180,00
Пристрій виводу текстової інформації	0,20	3,5	5,25
Оргтехніка	0,45	1,5	5,06
IP телефон Escene ES410PE	0,06	105,0	47,25
Маршрутизатор TP-LINK Archer AX73	0,03	105,0	23,63
Маршрутизатор Asus TUF Gaming AX6000	0,04	105,0	31,50
Роутер	0,04	105,0	31,50
Термінальне обладнання	0,09	105,0	70,88
Всього			1493,06

4.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій ETHERNET та WIFI» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

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

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (4.13)$$

де H_{cv} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo $H_{cv} = 20\%$.

$$B_{cv} = (59961,90 + 3442,75) \cdot 20 / 100\% = 12680,93 \text{ грн.}$$

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 $H_{cn} = 30\%$.

$$B_{cn} = (59961,90 + 3442,75) \cdot 30 / 100\% = 19021,40 \text{ грн.}$$

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:

$$I_{\text{в}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{в}}}{100\%}, \quad (4.15)$$

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

$$I_{\text{в}} = (59961,90 + 3442,75) \cdot 55 / 100\% = 34872,56 \text{ грн.}$$

4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

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

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

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

де $H_{\text{нзв}}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{\text{нзв}} = 100\%$.

$$B_{\text{нзв}} = (59961,90 + 3442,75) \cdot 100 / 100\% = 63404,66 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій ETHERNET та WIFI» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

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

$$B_{\text{заг}} = 59961,90 + 3442,75 + 7608,56 + 15622,91 + 3266,04 + 15915,58 + 12595,98 + 8608,95 + 9867,30 + 1493,06 + 12680,93 + 19021,40 + 34872,56 + 63404,66 = 268362,59 \text{ грн.}$$

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

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

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta = 0,9$.

$$ZB = 268362,59 / 0,9 = 298180,65 \text{ грн.}$$

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 «Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій ETHERNET та WIFI» 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. Прийmemo $I = 4$;

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

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

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

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 298180,65$ 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 [28].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 2 \cdot 4 / 298,2 \cdot 0,17 = 10,30.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій ETHERNET та WIFI» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

4.4 Висновок до розділу 4

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій ETHERNET та WIFI» складають 298180,65 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему

«Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій ETHERNET та WIFI» 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 ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Сучасний розвиток науки та техніки вносить принципові нововведення в усі сфери матеріального виробництва, суттєво змінюючи технологічні процеси та використовувані матеріали, предмети і знаряддя праці. Натомість, зміни технології та устаткування призводять до трансформації умов праці та трудового процесу в цілому. Тому, при розробці нової техніки, технологічних процесів, організації виробництва, необхідно провести науковий аналіз можливих небезпечних і шкідливих виробничих чинників і розробити заходи і засоби, спрямовані на мінімізацію їх несприятливого впливу на людину, що працює.

У сучасних умовах в Україні діє велика кількість малих, середніх і великих підприємств виробничого, будівельного, сільськогосподарського, транспортного призначення, підприємств громадського харчування, сфери послуг тощо. Працедавці таких підприємств несуть повну відповідальність за створення безпечних та здорових умов праці для робітників і службовців, попередження випадків травматизму, профзахворювань, аварій та пожеж.

«Охорона праці в галузі» – нормативна дисципліна, яка вивчається у вищих навчальних закладах з метою формування у майбутніх фахівців знань щодо стану і проблем охорони праці в галузі згідно з напрямом їх підготовки, складових і функціонування системи управління охороною праці та шляхів, методів і засобів забезпечення умов виробничого середовища і безпеки праці в галузі, згідно з чинними законодавчими та іншими нормативно-правовими актами.

На дослідника оптимальної структури мережі на основі технологій Ethernet та Wi-Fi можуть впливати такі небезпечні та шкідливі фактори, у відповідності з прийнятою класифікацією.

Фізичні: підвищена та понижена температура повітря робочої зони; підвищена та понижена рухливість повітря робочої зони; недостатня освітленість робочої зони; недостатність природного освітлення; небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання якого може відбутися через тіло людини;

підвищена та понижена вологість повітря; підвищений рівень електромагнітного опромінення.

Психофізіологічні: нервово – психічні перевантаження (монотонність праці, емоційні перевантаження, перенапруга аналізаторів).

У роботі висвітлюються дослідження на тему «Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій Ethernet s та Wi-Fi», надалі, більш детально описані вимоги безпечної роботи з джерелами електромагнітних випромінювань.

5.1 Технічні рішення з безпечного виконання робіт.

5.1.1 Технічні рішення з організації робочого місця під час дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій Ethernet s та Wi-Fi.

Якщо існують невідповідності вимогам норм у залежності від робочого діапазону частот, характеру виконуваних робіт, рівня опромінення і необхідної ефективності захисту застосовують наступні способи та засоби захисту або їх комбінації:

захист часом та відстанню;

зменшення параметрів випромінювання безпосередньо в самому джерелі випромінювання;

екранування джерела випромінювання;

екранування робочого місця;

раціональне розташування установок в робочому приміщенні;

встановлення раціональних режимів експлуатації установок та роботи обслуговуючого персоналу;

застосування засобів попереджувальної сигналізації (світлова, звукова тощо);

виділення зон випромінювання; застосування засобів індивідуального захисту.

Захист часом передбачає обмеження часу перебування людини в робочій зоні, якщо інтенсивність опромінення перевищує норми, встановлені за умови опромінення на протязі зміни, і застосовується, коли немає можливості зменшити інтенсивність опромінення до допустимих значень і тільки для випромінювань в діапазоні 300 МГц – 300 ГГц, а також для електростатичного та електричного поля частотою 50 Гц. Допустимий час перебування залежить від інтенсивності опромінення. Захист відстанню застосовується коли неможливо послабити інтенсивність опромінення іншими заходами, у тому числі й скороченням часу перебування людини в небезпечній зоні. В цьому випадку збільшують відстань між джерелом випромінювання і обслуговуючим персоналом. Цей вид захисту ґрунтується на швидкому зменшенні інтенсивності поля з відстанню. Електромагнітна енергія, випромінювана окремими елементами електротермічних установок та радіотехнічної апаратури, при відсутності екранів (настроювання, регулювання, випробування) поширюється в приміщенні, відбивається від стін та перекриттів, частково проходить крізь них і трохи розсіюється в них. В результаті утворення стоячих хвиль в приміщенні можуть створюватися зони з підвищеною густиною ЕМВ. Тому роботи рекомендується проводити в кутових приміщеннях першого та останнього поверхів будинків. Для захисту персоналу від опроміненень потужними джерелами ЕМВ поза приміщеннями необхідно раціонально планувати територію радіоцентру, виносити служби за межі антенного поля, встановлювати безпечні маршрути руху людей, екранувати окремі будівлі та ділянки території. Зони опромінення виділяються на основі інструментальних вимірювань інтенсивності опромінення для кожного конкретного випадку розташування апаратури. Поверхня одношарових скелець повернута до ока, покрита безколірною прозорою плівкою двоокису олова, яка дає ослаблення електромагнітної енергії до 30 дБ при пропусканні світла не менше 75 %. Для контролю рівнів ПК застосовують різні вимірювальні прилади у залежності від діапазону частот. Вимірювання проводять в зоні перебування персоналу від рівня підлоги до висоти 2 м через кожні 0,5 м.

5.1.2 Електробезпека

Для забезпечення електробезпеки застосовують окремо або у поєднанні один з іншим наступні технічні способи та засоби: захисне заземлення, занулення.

Захисним заземленням називається навмисний електричний контакт із землею або її еквівалентом металевих не струмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою при замиканні на корпус та через інші причини. Завдання захисного заземлення – усунення небезпеки ураження струмом у випадку доторкання до корпусу та інших струмоведучих металевих частин електроустановки, що опинилися під напругою. Захисне заземлення застосовують у трифазних мережах з ізольованою нейтраллю.

Принцип дії захисного заземлення – зменшення напруги між корпусом, що опинився під напругою, та землею до безпечного значення. У якості провідників заземлення дозволяється використовувати різні металеві конструкції: ферми, шахти ліфтів, підйомників, сталеві труби електропроводок, відкрито прокладені стаціонарні трубопроводи різного призначення (крім трубопроводів горючих та вибухонебезпечних газів, каналізації і центрального опалення).

Зануленням називається навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним провідником металевих не струмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою внаслідок замикання на корпус та через інші причини. Завдання занулення – усунення небезпеки ураження струмом у випадку контакту з корпусом та іншими неструмоведучими металевими частинами електроустановки, що опинилися під напругою внаслідок замикання на корпус. Вирішується це завдання швидким вимкненням пошкодженої електроустановки із мережі. Принцип дії занулення – перетворення замикання на корпус в однофазне коротке замикання (тобто замикання між фазними та нульовими проводами) з метою викликати більший струм, здатний забезпечити спрацьовування захисту і цим самим автоматично вимкнути пошкоджену установку із мережі живлення. Таким захистом можуть бути плавкі запобіжники,

магнітні пускачі з тепловим захистом, контактори у поєднанні з тепловими реле, автомати, що здійснюють захист одночасно від струмів короткого замикання та від перевантаження.

Класифікація приміщень за категоріями електробезпеки залежно від мікроклімату виробничих будівель. Допустимими визнаються умови праці у будівлях, де відносна вологість повітря не перевищує 60%, температура повітря не перевищує 35 °С, а пил та хімічно агресивне середовище – відсутні. За таких умов праці мікроклімат вважається сухим. Вологими називаються умови роботи, де відносна вологість повітря становить від 60% до 75%. Сирі – це такі умови, які характеризуються відносною вологістю повітря в будівлі більшою за 75%. Особливо сирі умови – це умови, із майже стовідсотковою відносною вологістю повітря. Гарячими умовами праці є становище, при якому температура повітря перевищує 35 °С. Запиленими визнаються умови, при яких виділяється велика кількість виробничого пилу, внаслідок чого він може залишатись на зовнішніх поверхнях або навіть проникати у середину обладнання чи апаратів. До умов праці з хімічно активним середовищем відносять умови, при яких у повітрі протягом тривалого часу залишаються гази або краплі рідин, які негативно впливають на ізолюючі властивості і струмопровідні елементи електричних інструментів.

Класифікація приміщень за рівнем електробезпеки Відповідно до ПУЕ, усі промислові приміщення (цехи, майстерні, склади) за ступенем ймовірності ураження електричним струмом можна розділити на три категорії: Будівлі з підвищеною небезпекою До цього типу будівель належать споруди, в яких наявний принаймні один із таких факторів: сирі приміщення, відносна вологість в яких протягом тривалого часу перевищує 75%; приміщення, в яких пил покриває провідники, забивається всередину машин та обладнання; приміщення зі струмопровідними підлогами (металевими, земляними, цегляними, залізобетонними); приміщення, в яких середня температура повітря зазвичай перевищує +30 °С; приміщення, в яких існує ймовірність одночасного торкання

співробітника до зовнішніх елементів електричного устаткування і заземлених металевих конструкцій будівель, технологічного обладнання тощо.

Будівлі з особливо небезпечними умовами Ці будівлі характеризуються як дуже сирі приміщення зі стовідсотковою відносною вологістю. Стеля, стіни, підлога, устаткування у таких приміщеннях постійно вкриті тонким шаром крапель чи пліснявою. Слід бути вкрай обережними, оскільки при виконанні робіт з використанням електричної напруги на відкритому повітрі, всередині посудин, всередині непросохлих приміщень ймовірність ураження співробітників чи сторонніх осіб електричним струмом дуже висока. До будівель з особливо небезпечними умовами належать також споруди з хімічно активним середовищем, яке завдяки своїм властивостям завдає шкоду ізоляції та електричним матеріалам. Окрім того, будівлі, які мають одночасно дві або більше ознаки приміщень з підвищеною небезпекою так само належать до будівель із особливо небезпечними умовами.

Будівлі без факторів збільшеної небезпеки До цієї категорії належать будівлі, в яких немає жодної з ознак, властивих приміщенням з підвищеною або особливою небезпекою.

Підсумовуємо, що для створення оптимальних умов електробезпеки в робочому приміщенні потрібно підтримувати режим вологості повітря на рівні 60%, для того щоб приміщення було сухим, та температуру повітря не вище 35°C. Постійний моніторинг середовища, на предмет пилу та хімічно агресивних речовин у складі повітря, для забезпечення електробезпеки приміщення. Заземлення електропристроїв для уникнення аварійної ситуації.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Метеорологічні умови виробничих приміщень (санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042–99) можна оцінювати за сукупністю таких факторів, як температура (t , °C), відносна вологість (P , %),

швидкість руху повітря (V , м/с) та величина інтенсивності теплового опромінення (E , Вт/м²).

За ступенем впливу на тепловий стан людини мікрокліматичної умови поділяють на оптимальні та допустимі. Оптимальні мікрокліматичні умови – поєднання параметрів мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливі на людину забезпечують зберігання нормального теплового стану організму без активізації механізмів терморегуляції. Вони забезпечують відчуття теплового комфорту та створюють передумови для високого рівня працездатності [3]. Допустимі мікрокліматичні умови – поєднання параметрів мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливі на людину можуть викликати зміни теплового стану організму, що швидко минають і нормалізуються та супроводжуються напруженням механізмів терморегуляції в межах фізіологічної адаптації. При цьому не виникає ушкоджень або порушень стану здоров'я, але можуть спостерігатися дискомфортні теплові відчуття, погіршення самопочуття та зниження працездатності [3].

Категорія робіт – розмежування робіт за важкістю на основі загальних енерговитрат організму [3]. Легкі фізичні роботи (категорія І) охоплюють види діяльності, при яких витрата енергії дорівнює 105–140 Вт (90–120 ккал/год.) – категорія Іа та 141–175 Вт (121–150 ккал/год.) – категорія Іб. До категорії Іа належать роботи, що виконуються сидячи і не потребують фізичного напруження. До категорії Іб належать роботи, що виконуються сидячи, стоячи або пов'язані з ходінням та супроводжуються деяким фізичним напруженням.

Визначаємо наявну категорію робіт, як Іб. Основними нормативними документами, що регламентують параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 [5].

Допустимі параметри мікроклімату наведені в табл.1.

Таблиця 1 – Параметри мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура, °С		Відносна вологість	Швидкість руху, X
		Допустима	Допустима		
		Верхня межа	Нижня межа	Допустима	Допустима
Холодний	Іб	20-24	17-25	75	не більше 0,2
Теплий		21-28	19-30	55 при 27 °С	0,1-0,3

Для забезпечення комфортності і безпечності трудового процесу рекомендовано дотримуватись вищенаведених параметрів мікроклімату і корегувати їх відповідними технічними засобами: системою опалення, вентиляції, кондиціонування.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

При виконанні даного виду робіт немає небезпеки виділення шкідливих речовин у повітря, але потрібен контроль за складом повітря робочої зони та при збільшенні допустимих норм проводити заходи, щодо усунення надлишку шкідливих речовин.

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачені наступні рішення:

- застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами, які встановленні безпосередньо на дільницях біля обладнання із яких очищене повітря поступає у виробниче приміщення;
- необхідно проводити контроль за ГДК шкідливих речовин у приміщенні;
- застосовувати природну вентиляцію: організовану і неорганізовану.

5.2.3 Виробниче освітлення

Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 [6] Система природного освітлення відноситься до бокової. Характеристика зорових робіт – середньої точності.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 2:

Таблиця 2 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, ЛК		КПО, %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє	Бокове	Верхнє або верхнє	Бокове
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0	IV	б	середній	середній	200	500	4	1,5	2,4	0,9

При експлуатації штучного освітлення здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

5.2.4 Виробничий шум

Звук або шум виникає при механічних коливаннях у твердих, рідких та газоподібних середовищах. Звуки, що передаються будівельними

конструкціями, називаються структурними, а ті що поширюються у повітряному середовищі, прийнято називати повітряним шумом. Будь-який небажаний звук називають шумом. Шум шкідливий для здоров'я, зменшує працездатність, підвищує рівень небезпеки. Тому необхідно передбачати заходи захисту від шуму. А для цього потрібно володіти відповідними знаннями. Як правило, шум нас дратує: заважає працювати, відпочивати, думати. Але шум може впливати і позитивно. Такий вплив на людину чинить, наприклад, шелест листя дерев, помірний стукіт дощових крапель, рокіт морського прибою. Позитивний вплив спокійної приємної музики відомий з давніх часів. Тому різноманітні оздоровчі процедури супроводжуються спокійною симфонічною або блюзовою музикою.

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99 [8]. За цими нормами рівень шуму не може перевищувати 65 Дб.

Існують такі способи боротьби з шумом механічного походження та вібрацією:

- зменшення шуму та вібрації безпосередньо в джерелах їх виникнення, застосовуючи обладнання, що не утворює шуму, замінюючи ударні технологічні процеси безударними, застосовуючи деталі із матеріалів з високим коефіцієнтом внутрішнього тертя (пластмаса, гума, деревина та ін), підшипники ковзання замість кочення, косозубі та шевронні зубчасті передачі замість прямозубих, проводячи своєчасне обслуговування та ремонт елементів, що створюють шум та ін.;

- зменшення шуму та вібрації на шляхах їх розповсюдження заходами звуко- та віброізоляції, а також вібро- та звукопоглинання;

- зменшення шкідливої дії шуму та вібрації, застосовуючи індивідуальні засоби захисту та запроваджуючи раціональні режими праці та відпочинку.

Одним з найпростіших та економічно доцільних способів зниження шуму є застосування методів звукоізоляції та звукопоглинання.

5.2.5 Електромагнітні випромінювання

Електромагнітні поля мають потужний вплив на людський організм. Вони негативно впливають майже на усі системи організму. Тому треба створювати певні методи захисту від їх дії. Найпоширенішими з таких методів є такі:

- зменшення щільності потоку енергії, якщо дозволяє даний технологічний процес або обладнання.
- захист часом (тобто обмеження часу знаходження у зоні джерела ЕМП).
- захист відстанню.
- екранування робочого місця чи джерела.
- раціональне планування робочого місця.
- застосування засобів попереджувальної сигналізації.
- застосування засобів особистого захисту.

Для зменшення впливу електромагнітних полів на персонал, який знаходиться у зоні дії деяких радіоелектронних засобів необхідним є ряд захисних заходів: організаційні, інженерно-технічні та лікувально-профілактичні.

На етапі проектування взаємне розміщення об'єктів має бути забезпечено таким чином, щоб інтенсивність опромінення була мінімальною. Також треба заздалегідь попідкуватися про зменшення часу перебування персоналу у зоні опромінення. Потужність джерел випромінювання повинна бути найменшою з можливих.

5.2.6 Психофізіологічні фактори

Психофізіологічні фактори небезпеки – чинники, обумовлені особливостями фізіології та психології людини, що можуть завдати їй шкоди за певних обставин.

Небезпечні та шкідливі психофізіологічні виробничі чинники залежно від характеру дії поділяють на такі групи:

- фізичні перевантаження (статичні, динамічні);
- нервово-психічні перевантаження (розумові перевантаження, перевантаження аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження)

Психофізіологічні фактори вибираються відповідно з Гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу [8].

Оптимальні умови праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження:

Зміст роботи – рішення складних завдань з вибором за алгоритмом;

Сприймання інформації та їх оцінка – сприймання інформації з наступною корекцією дій та операцій;

Розподіл функцій за ступенем складності завдання - обробка, контроль, перевірка завдання.

Сенсорні навантаження:

Зосередження (%за зміну) – до 50%;

Щільність сигналів (звукові за 1 год) – до 150;

Навантаження на слуховий аналізатор (%) – розбірливість слів та сигналів від 50 до 80 %;

Навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 20 до 25%.

Емоційне навантаження:

Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; Ступінь ризику для власного життя – вірогідний;

Ступінь відповідальності за безпеку інших осіб – є відповідальним за безпеку інших.

Режим праці:

Тривалість робочого дня – більше 8 год;

Змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

5.3.1 Дія вогню на живі організми під час пожежі

Коли людина перебуває в зоні впливу пожежі, то вона може потрапити під дію таких небезпечних та шкідливих чинників: токсичні продукти горіння; вогонь; підвищена температура середовища; дим; недостатність кисню; руйнування будівельних конструкцій; вибухи; витікання небезпечних речовин, що відбуваються внаслідок пожежі; паніка.

Токсичні продукти горіння становлять найбільшу загрозу для життя людини, особливо при пожежах у будівлях. Адже в сучасних виробничих, побутових та адміністративних приміщеннях знаходиться значна кількість синтетичних матеріалів, що є основними джерелами токсичних продуктів горіння. Так, при горінні пінополіуретану та капрону утворюється ціанистий водень (синильна кислота), вініпласту – хлористий водень та оксид вуглецю, лінолеуму – сірководень та сірчистий газ і тощо. Найчастіше при пожежах відзначається високий вміст у повітрі оксиду вуглецю. Так, у підвалах, шахтах, тунелях, складах його вміст може становити від 0,15 до 1,5%, а в приміщеннях – 0,1-0,6%.

Вогонь – надзвичайно небезпечний чинник пожежі, однак випадки його безпосередньої дії на людей зустрічаються досить рідко. Під час пожежі температура полум'я може досягати 1200-1400 °С і у людей, що знаходяться у зоні пожежі випромінювання полум'я можуть викликати опіки та больові відчуття.

Небезпека підвищеної температури середовища полягає у тому, що вдихання розігрітого повітря разом із продуктами горіння може призвести до ураження органів дихання та смерті. В умовах пожежі підвищення температури середовища до 60 °С вже є життєво небезпечною для людини.

Дим являє собою велику кількість видимих найдрібніших твердих та (або)

рідинних часточок незгорівших речовин, що знаходяться в газах у завислому стані. Він викликає інтенсивне подразнення органів дихання та слизових оболонок (сильний кашель, слезотечу тощо). Крім того, у задимлених приміщеннях внаслідок погіршення видимості сповільнюється евакуація людей, а часом провести її зовсім неможливо. Так, при значній задимленості приміщення видимість предметів, що освітлюються лампочкою потужністю 20 Вт, складає не більше 2,5 м.

Недостатність кисню спричинена тим, що в процесі горіння відбувається хімічна реакція окислення горючих речовин та матеріалів. Небезпечною для життя людини уже вважається ситуація, коли вміст кисню в повітрі знижується до 14% (норма 21 %). При цьому втрачається координація рухів, з'являється кволість, запаморочення, гальмування свідомості. При концентрації кисню 9-11% смерть настає через кілька хвилин.

Вибухи, витікання небезпечних речовин можуть бути спричинені їх нагріванням під час пожежі, розгерметизацією посудин та трубопроводів з небезпечними рідинами та газами тощо. Вибухи збільшують площу горіння і можуть призводити до утворення нових осередків пожеж. Люди, що перебувають поблизу, можуть потрапити під дію вибухової хвилі, діставати ураження уламками тощо.

Руйнування будівельних конструкцій відбувається внаслідок втрати ними несучої здатності під впливом високих температур та вибухів. При цьому люди можуть одержати значні механічні травми, опинитися під уламками завалених конструкцій. До того ж, евакуація може бути просто неможливою, внаслідок завалів евакуаційних виходів та руйнування шляхів евакуації [1].

5.3.2 Визначення кількості вогнегасників

Вихідні дані: розміри приміщення (м): $16 \cdot 6 \cdot 3,2$.

Згідно ОНТП 24-86, приміщення, де використовуються персональні комп'ютери, слід оснащувати переносними вуглекислотними або порошковими

вогнегасниками ємністю 3 л з розрахунку: один вогнегасник на кожні 20 м² підлоги приміщення.

Таким чином, орієнтовна кількість вогнегасників визначається за формулою:

$$n = \frac{S_{\Pi}}{S_{\Pi 1}} \text{ [шт]}, \quad (5.1)$$

де S_{Π} – площа підлоги приміщення, м²;

$S_{\Pi 1}$ – площа підлоги, що припадає на один вогнегасник ($S_{\Pi 1} = 20 \text{ м}^2$).

За відомими розмірами приміщення знайдемо площа підлоги приміщення:

$$S_{\Pi} = ab \text{ [м}^2\text{]}, \quad (5.2)$$

де a – довжина приміщення, м;

b – ширина приміщення, м.

Таким чином, площа підлоги приміщення складає

$$S_{\Pi} = 16 \cdot 6 = 96 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Отже, визначаємо орієнтовну кількість вогнегасників:

$$n = 96 / 20 = 4,8 \text{ (шт)}.$$

Отримане значення заокруглюємо до найближчого більшого значення $n = 5$ шт.

5.3.3 Розробка превентивних заходів з підвищення безпеки роботи в умовах дії НС

З метою попередження пожежі проводяться організаційні, технічні, експлуатаційні і режимні заходи.

До організаційних заходів відносяться: навчання працюючих правилам пожежної безпеки, проведення інструктажів, бесід, лекцій та ін.

До технічних – дотримування протипожежних правил і норм при встановленні опалення, вентиляційного обладнання.

До експлуатаційних – заходи, які передбачають правильну експлуатацію машин, обладнання, транспорту, правильне утримання будинків та території.

Висновки

Визначено кількість вогнегасників у виробничому приміщенні. Розроблено превентивні заходи з підвищення безпеки роботи в умовах дії НС.

ВИСНОВКИ

На сьогоднішній день технологія Wi-Fi є однією з найбільш популярних і затребуваних технологій побудови бездротових мереж передачі інформації. Очікування споживачів постійно зростають, а вимоги до якості обслуговування для різних типів трафіку стають все більш жорсткими і неоднорідними. Зокрема, доповнення, які нещодавно були завершені або знаходяться в процесі на момент написання статті, описують нові методи підтримки ефективної передачі важких потоків даних, коротких повідомлень від великої кількості автономних пристроїв і даних додатків в реальному часі. При цьому ключову роль відіграють нові методи множинного доступу, реалізовані в технології Wi-Fi.

У роботі розроблено комплекс математичних моделей цих нових методів множинного доступу для дослідження їх ефективності з точки зору надійності та часу доставки пакетів і споживання каналів. Крім того, були розроблені алгоритми підвищення ефективності цих методів доступу.

Показано, як за допомогою розроблених моделей визначаються параметри резервування та схеми передачі даних, що дозволяють задовольнити вимоги до якості обслуговування мультимедійних потоків при мінімальних витратах каналних ресурсів. Проведено масштабне порівняння результатів аналітичного і імітаційного моделювання, за допомогою якого показано, що припущення, зроблені при розробці моделей, дещо погіршують їх точність. Розглянуті питання практичного використання періодичних резервувань в мережах Wi-Fi, в результаті чого формулюється рекомендація з використання періодичності, кратній заданій.

Розроблено методику моделювання потокової передачі даних з використанням різних методів доступу, заснованих на періодичному резервуванні каналів у мережах Wi-Fi в умовах перешкод з метою вибору параметрів резервування, що забезпечують відповідність вимогам до якості обслуговування при мінімальних витратах ресурсів каналу.

Під час дослідження було розроблено розділ з охорони праці, де розглянуто правила поведінки щодо проведення досліджень та експлуатації, описано норми поведінки із електроприладами, врахування дії електромагнітного випромінювання і психофізіологічних факторів, розраховано мікроклімат та освітлення. Також було надано увагу пожежній безпеці, проведені розрахунки для приміщення для досліджень та визначено рекомендовану кількість вогнегасників.

Під час дослідження також було розроблено розділ з економічної частини, в якому було обгрунтовано економічну доцільність проведення дослідження, науково-економічний ефект, розраховано розмір витрат на дослідження, а також проведено оцінку важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications // IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016). — 2021. — С. 1—4379. — DOI: 10.1109/IEEESTD.2021.9363693.
2. Gast M. 802.11n: A Survival Guide. — O'Reilly Media, Inc., 2012.
3. Gast M. S. 802.11ac: A Survival Guide. — O'Reilly, 2013.
4. IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications // IEEE Std 802.11-1997. — 1997. — С. 1—445. — DOI: 10.1109/IEEESTD.1997.85951.
5. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 1: Enhancements for High-Efficiency WLAN // IEEE Std 802.11ax-2021 (Amendment to IEEE Std 802.11-2020). — 2021. — С. 1—767. — DOI: 10.1109/IEEESTD.2021.9442429.
6. Wi-Fi Alliance® introduces Wi-Fi 6. — URL: <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-6>.
7. FCC ADOPTS NEW RULES FOR THE 6 GHz BAND, UNLEASHING 1,200 MEGAHERTZ OF SPECTRUM FOR UNLICENSED USE / Federal Communications Commission, USA. — URL: <https://www.fcc.gov/document/fcc-opens-6-ghz-band-wi-fi-and-other-unlicensed-uses>. Countries Enabling Wi-Fi 6E. — URL: <https://www.wi-fi.org/countries-enabling-wi-fi-6e>.
8. IEEE P802.11be/D1.1 Draft Standard for Information Technology – Telecommunications and Information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 8: Enhancements for extremely high throughput (EHT). — 07.2021.

9. IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High Speed Physical Layer in the 5 GHz band // IEEE Std 802.11a-1999. — 1999. — C. 1—102. — DOI: 10.1109/IEEESTD.1999.90606.

10. IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information exchange between systems - Local and Metropolitan networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher Speed Physical Layer (PHY) Extension in the 2.4 GHz band // IEEE Std 802.11b-1999. — 2000. — C. 1— 96. — DOI: 10.1109/IEEESTD.2000.90914.

11. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific (Amend- ment to IEEE Std 802.11, 1999 Edn. (Reaff 2003) as amended by IEEE Stds 802.11a-1999, 802.11b-1999, 802.11b-1999/Cor 1-2001, and 802.11d-2001). — 2003. — C. 1—104. — DOI: 10.1109/IEEESTD.2003.94282.

12. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11w-2009). — 2009. — C. 1—565. — DOI: 10.1109/IEEESTD.2009.5307322.

13. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and Infor- mation exchange between systems Local and metropolitan area networks. Specifications – Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz. — 12.2013.

14. Eldad P., Stacey R. Next Generation Wireless LANs: 802.11n and 802.11ac. — Cambridge University Press, 2015.

15. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control // IEEE Std 802.11e-2005 (Amendment to IEEE Std 802.11, 1999 Edition (Reaff 2003). — 2005. — C. 1—212. — DOI: 10.1109/IEEESTD.2005.97890.

16. Yan Xin et al. Technical Report on Full Duplex for 802.11. — URL: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-0498-08-00fd-fd-tig-report.docx>.

17. Full Duplex for Next Generation of 802.11 / M. Gan [и др.] // 2019 IEEE 30th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications — 2019. — С. 1—6. — DOI: 10.1109/PIMRCW.2019.8880844.

18. Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges / S. R. Islam [и др.] // IEEE Commun. Surveys Tuts. — 2017. — Secondquarter. — Т. 19, № 2. — С. 721—742.

19. On the Performance of Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems with Randomly Deployed Users / Z. Ding [и др.] // Signal Processing Letters, IEEE. — 2014. — ИЮНЬ. — Т. 21. — DOI: 10.1109/LSP.2014.2343971.

20. User Grouping and Power Allocation for Downlink NOMA-Based Quadrature Spatial Modulation / Z. Hong [и др.] // IEEE Access. — 2020. — Т. 8. — С. 38136—38145.

21. Shin K., Jo O. Joint Scheduling and Power Allocation Using Non-Orthogonal Multiple Access in Directional Beam-Based WLAN Systems // IEEE Wireless Communications Letters. — 2017. — АВГ. — Т. 6, № 4. — С. 482—485.

22. Uddin M. F. Throughput performance of NOMA in WLANs with a CSMA MAC protocol // Wireless Networks. — 2019. — АВГ. — Т. 25, № 6. — С. 3365—3384.

23. SOMA for EHT, Doc: IEEE 802.11-18/1462r0 / J. Suh [и др.]. — 2018. — URL: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-1957-03-0eht-noma.pptx>.

24. Future Networks 2030: Architecture and Requirements / A. Yastrebova [и др.] // 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). — 2018. — С. 1—8. — DOI: 10.1109/ICUMT.2018.8631208.

25. Cisco Visual Networking Index (VNI) Complete Forecast Update, 2017–2022 / T. Barnett [и др.]. — Cisco, 2018. — URL: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/network-intelligence/service-provider/digital-transformation/knowledge-network-webinars/pdfs/1211_BUSINESS_SERVICES_CKN_PDF.pdf.

26. IEEE P802.11ax™ Meets Requirements for 5G Indoor Hotspot and Dense

Urban Deployments Enabling Enhanced Wireless Network Performance. — 2019. — URL: <https://standards.ieee.org/news/2019/5g-indoor-hotspot-and-dense-urban-deployments.html>.

27. AP Coordination in EHT. — 11.03.2019. — URL: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/19/11-19-0801-00-00be-ap-coordination-in-eh.pptx>.

28. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

29. ДСТУ OHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог OHSAS 18001:2007 (OHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с

30. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

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

32. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

33. 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>

34. Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14_nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html

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

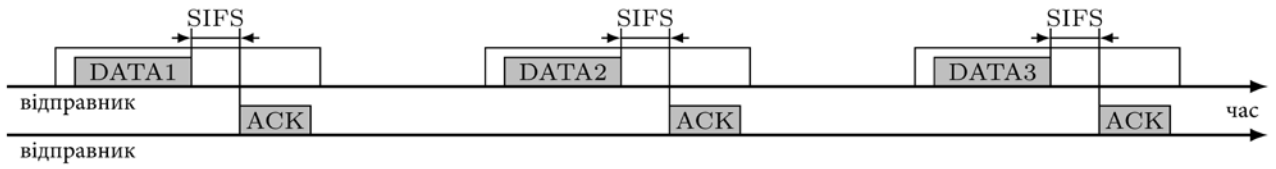
Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ
ТЕХНОЛОГІЙ ETHERNET ТА WI-FI
назва магістерської кваліфікаційної роботи

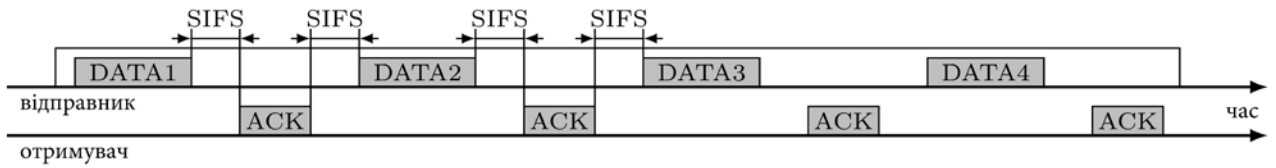
ЕВОЛЮЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ WI-FI

IEEE Standard	Year Adopted	Frequency	Max. Data Rate	Max. Range
802.11a	1999	5 GHz	54 Mbps	400 ft.
802.11b	1999	2.4 GHz	11 Mbps	450 ft.
802.11g	2003	2.4 GHz	54 Mbps	450 ft.
802.11n	2009	2.4/5 GHz	600 Mbps	825 ft.
802.11ac	2014	5 GHz	1 Gbps	1,000 ft.
802.11ac Wave 2	2015	5 GHz	3.47 Gbps	10 m.
802.11ad	2016	60 GHz	7 Gbps	30 ft.
802.11af	2014	2.4/5 GHz	26.7 Mbps – 568.9 Mbps (depending on channel)	1,000 m.
802.11ah	2016	2.4/5 GHz	347 Mbps	1,000 m.
802.11ax	2019 (expected)	2.4/5 GHz	10 Gbps	1,000 ft.
802.11ay	late 2019 (expected)	60 GHz	100 Gbps	300-500 m.
802.11az	2021 (expected)	60 GHz	Device tracking refresh rate 0.1- 0.5 Hz	Accuracy <1m to <0.1m

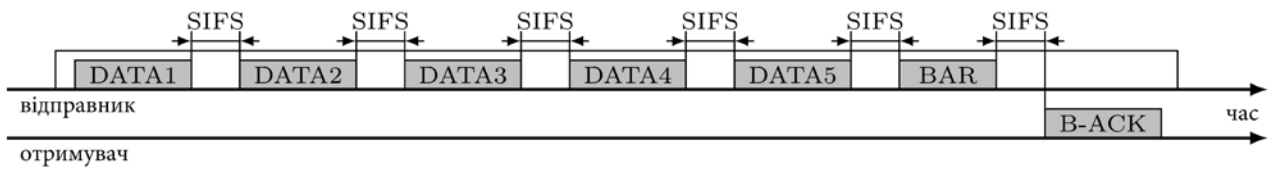
МЕТОДИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ



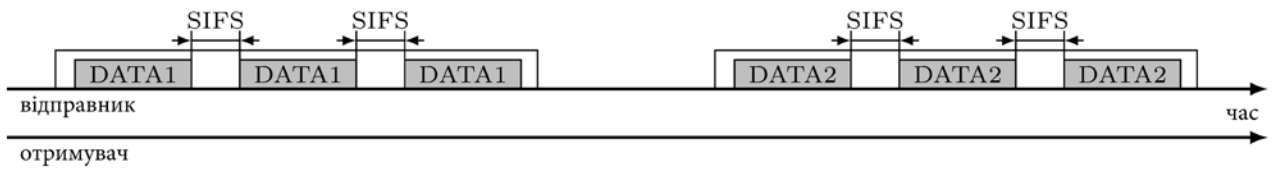
(а) Індивідуальна передача



(б) Послідовна передача

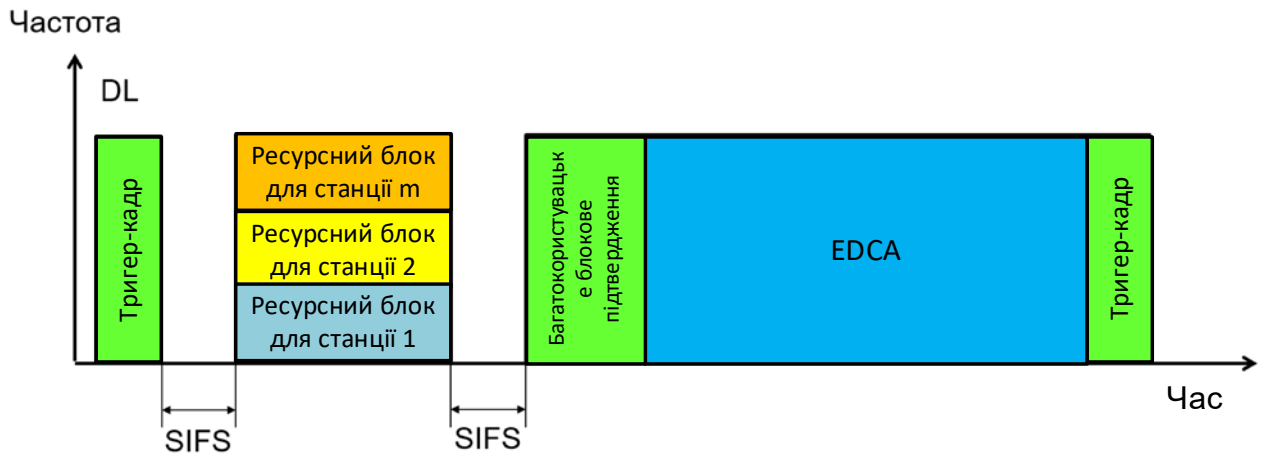


(в) Блочна передача

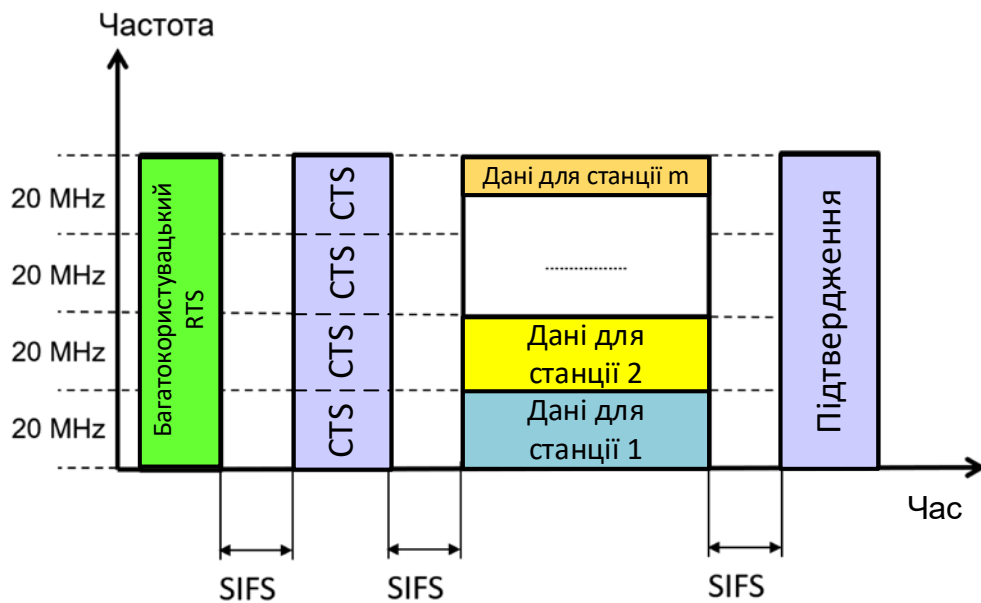


(г) Передача з безумовними повторами

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ OFDMA



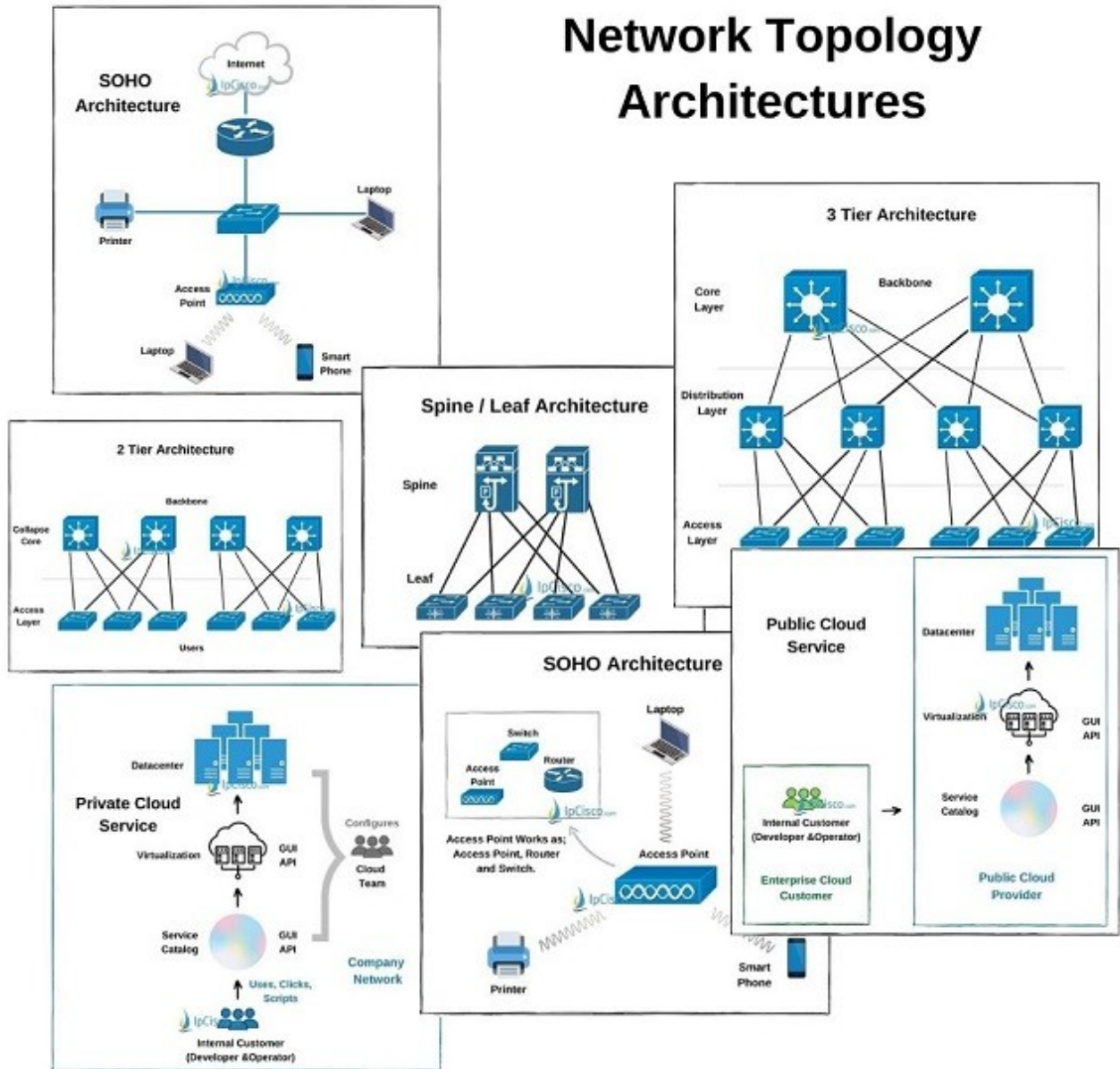
Приклад передачі даних без використання RTS/CTS



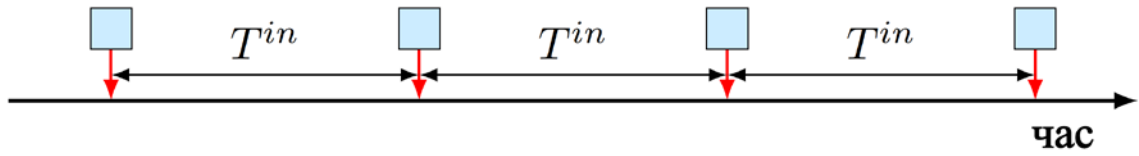
Приклад передачі даних за допомогою багатокористувачького RTS/CTS

АРХИТЕКТУРА МЕРЕЖИ НА ОСНОВИ ETHERNET

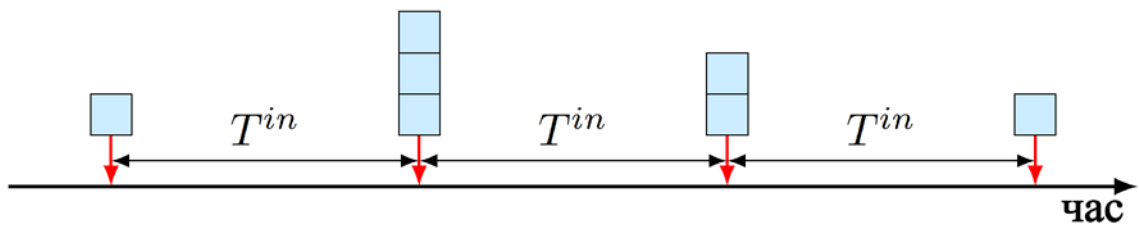
Network Topology Architectures



ТИПИ ПОТОКІВ МЕРЕЖІ

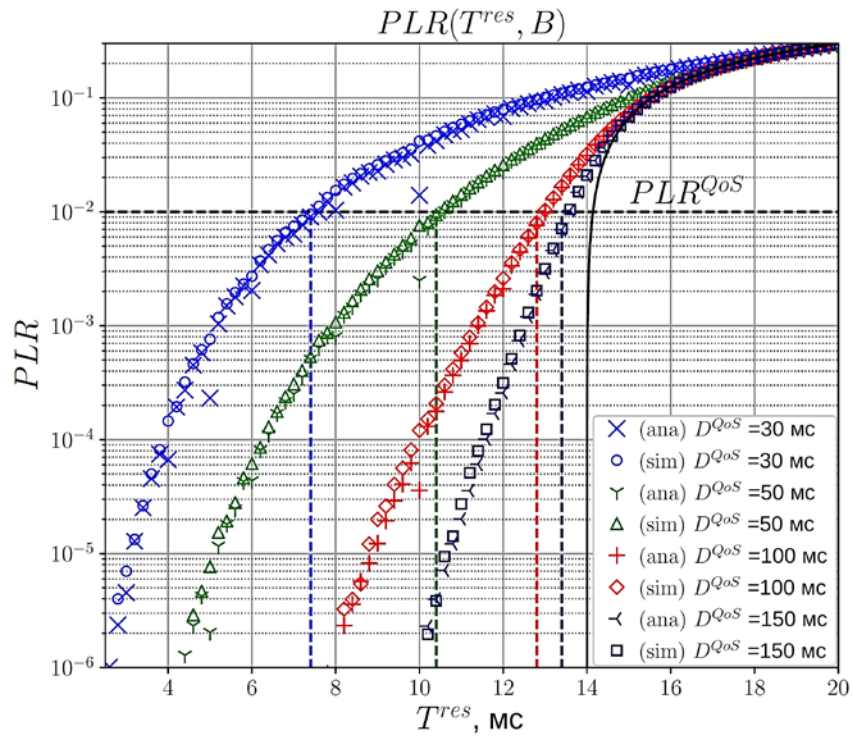
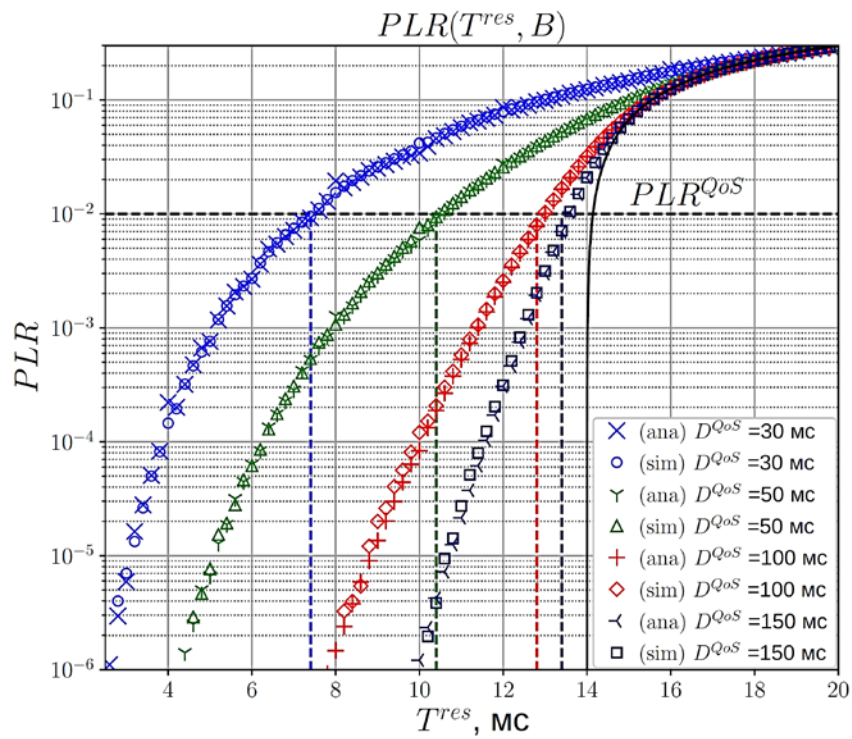


(а) Потік постійної інтенсивності

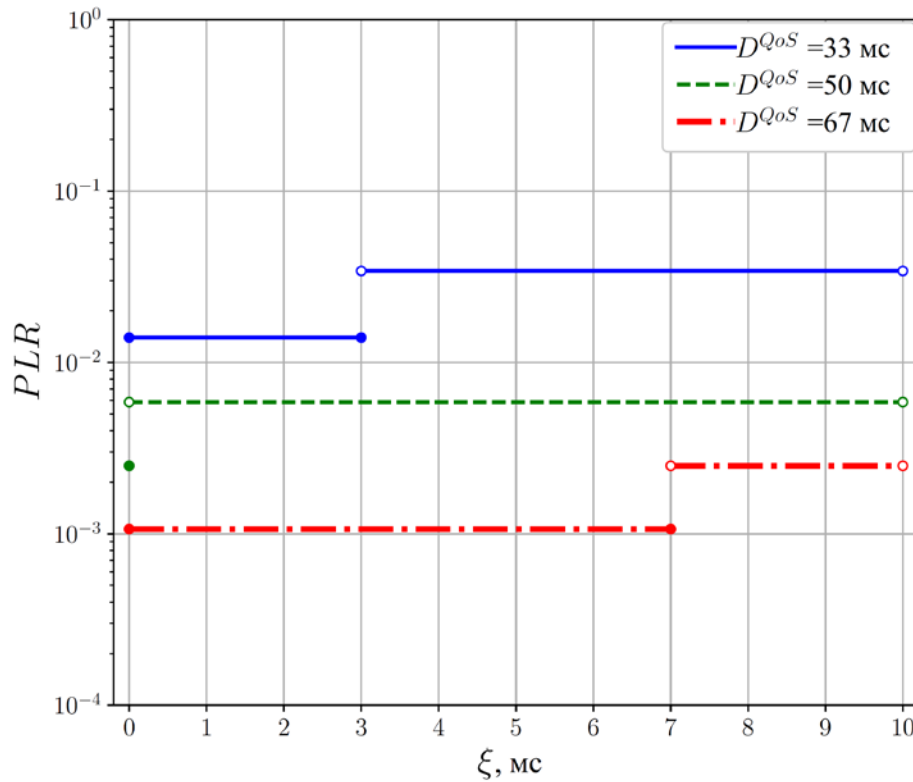


(б) Неординарний потік змінної інтенсивності

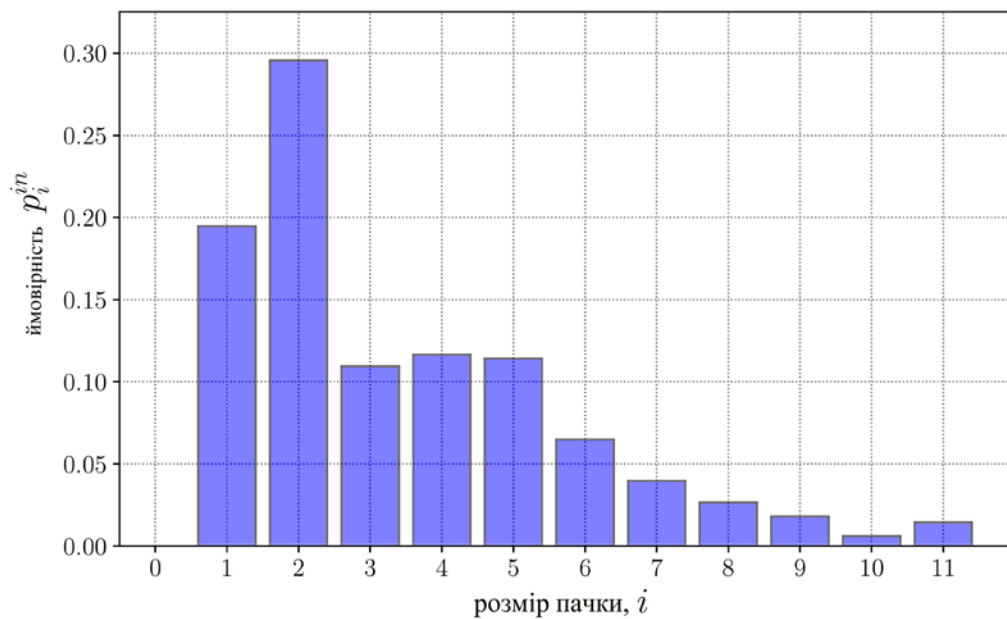
ЧИСЛОВІ РЕЗУЛЬТАТИ

(a) $\xi \in [0; \gamma]$ (б) $\xi \in (\gamma; \tau)$

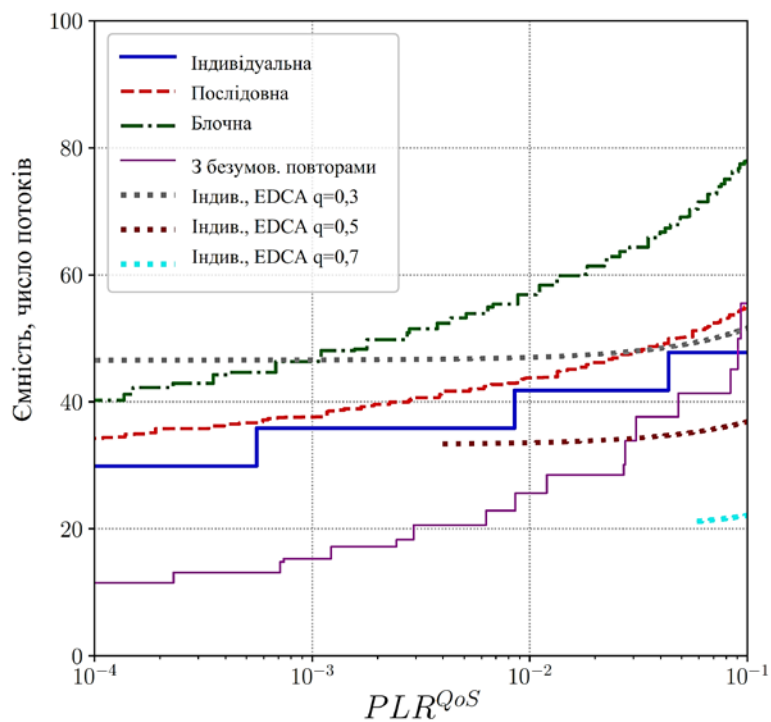
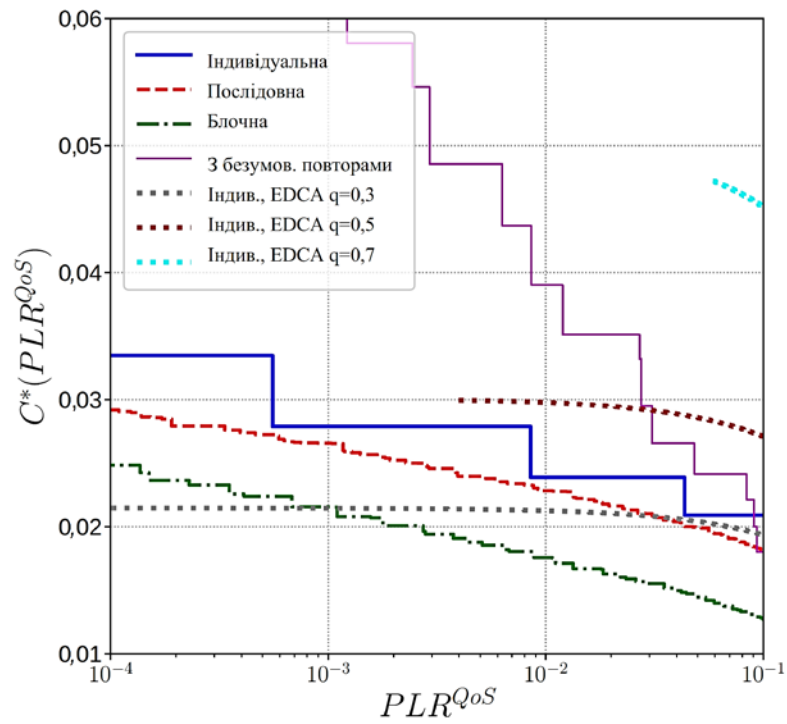
Залежність частки втрачених PLR-пакетів від T^{res} при $T^{\text{in}} = 20$ мс, $q = 0,3$ і різних значень ξ .



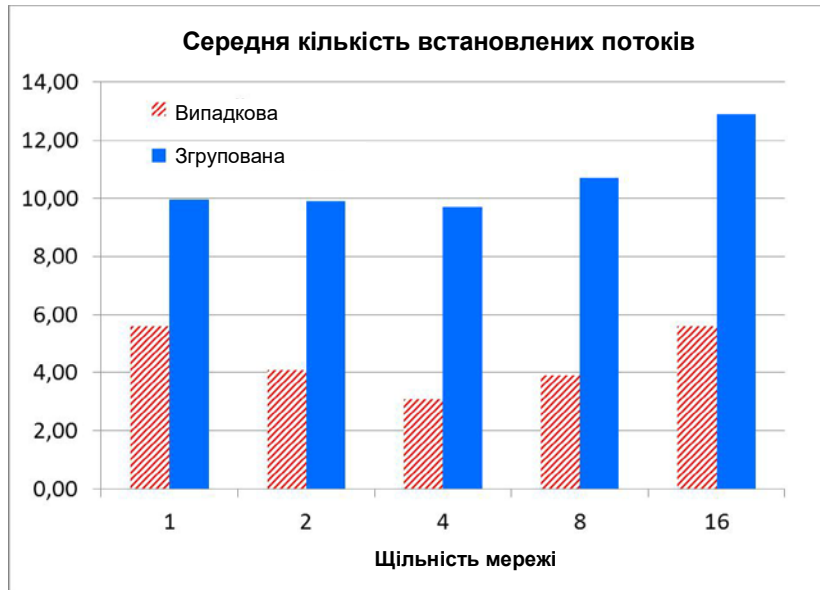
Залежність частки втрачених пакетів PLR від ξ для $T^{\text{in}} = 20$ мс, $T^{\text{res}} = 10$ мс, $q = 0,3$



Розподіл розміру пачок пакетів $\{p_i^{\text{in}}\}_{i=1}^M$



Витрата ресурсів каналу (сумарний час зайнятості каналу C^*) і ємність мережі при використанні різних способів передачі потоку змінної інтенсивності



Пропускна здатність мережі при різній щільності станції

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Дослідження оптимальної структури мережі на основі технологій Ethernet та Wi-Fi.

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

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


Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 95,39 % Схожість 4,61 %

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)

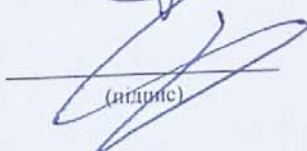
Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Рибачук Я.С.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Михалевський Д.В.
(прізвище, ініціали)