

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ДОСТУПУ ДО РЕСУРСІВ
КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ З МЕТОЮ ПОКРАЩЕННЯ ДОСТУПНОСТІ,
ЕФЕКТИВНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ»

на здобуття освітнього ступеня магістр
за спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Комп'ютерні системи та мережі
(назва)

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело*

(підпис)

Олександр КРУТЕНКО
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Виконав: здобувач вищої освіти гр.КСДМ-62

Олександр КРУТЕНКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:

Артем АНТОНЕНКО

к.т.н., доцент

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

науковий ступінь,
вчене звання

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Київ 2023

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

Кафедра Комп'ютерної інженерії

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Освітньо-професійна програма Комп'ютерні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру Комп'ютерної інженерії

Наталія ЛАЩЕВСЬКА

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

“ ” 2023 року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Крутенко Олександр Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Удосконалення засобів доступу до ресурсів комп'ютерних мереж з метою покращення доступності, ефективності та безпеки

керівник роботи Артем АНТОНЕНКО к.т.н., доцент

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від “19” 10 2023 р. №145

2. Строк подання кваліфікаційної роботи _____

3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи:

3.1. Інтернет ресурси стосовно засобів доступу до комп'ютерних мереж.

3.2. Імітаційне моделювання та статистичні методи обробки даних.

3.3. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1. Аналіз безпроводових комп'ютерних мереж, моделей та методів доступу до ресурсів комп'ютерних мереж.

4.2. Розробка імітаційної моделі МАС-підрівня безпроводової мережі.

4.3 Дослідження продуктивності роботи МАС-підрівня безпроводової мережі

4.4. Вдосконалення методу доступу до фізичного середовища пріоритетним обслуговуванням.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *презентація*

6. Дата видачі завдання “19” жовтня 2023р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1. | Підбір технічної літератури | .2023р. .2023р. | Виконано |
| 2. | Аналіз безпроводових комп'ютерних мереж, моделей та методів доступу до ресурсів комп'ютерних мереж | .2023р. .2023р. | Виконано |
| 3. | Розробка імітаційної моделі МАС-підрівня безпроводової мережі | .2023р. .2023р. | Виконано |
| 4. | Дослідження продуктивності роботи МАС-підрівня безпроводової мережі | .2023р. .2023р. | Виконано |
| 5. | Вдосконалення методу доступу до фізичного середовища пріоритетним обслуговуванням. | .2023р. .2023р. | Виконано |
| 6. | Оформлення роботи, висновки | .2023р. .2023р. | Виконано |
| 7. | Розробка демонстраційного матеріалу, доповідь | .2023р. .2023р. | Виконано |

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Олександр КРУТЕНКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Артем АНТОНЕНКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня магістр: 88 стор., 42 рис., 6 табл., 22 джерел.

Мета роботи – покращання доступності, ефективності та безпеки комп'ютерних мереж.

Об'єкт дослідження – засоби доступу до ресурсів комп'ютерних мереж.

Предмет дослідження – комп'ютерні мережі.

Короткий зміст роботи: В магістерській роботі розроблено і вдосконалено моделі та методи управління доступом до фізичного середовища безпроводових комп'ютерних мереж з покращеними характеристиками. Визначено особливості управління доступом до ресурсів безпроводових комп'ютерних мереж. Розроблено модель аналізу режимів доступу до фізичного середовища на основі зміни параметрів. Вдосконалено метод розподіленого доступу до фізичного середовища з пріоритетним обслуговуванням на основі адаптивного регулювання кількості категорій доступу забезпечує підвищену продуктивність безпроводової мережі на MAC-підрівні.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КОМП'ЮТЕРНІ МЕРЕЖІ, БЕЗПРОВОДОВІ КОМП'ЮТЕРНІ МЕРЕЖІ, ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ MAC-ПІДРІВНЯ, МЕТОДИ ДОСТУПУ ДО ФІЗИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

ABSTRACT

The text part of the qualification work for obtaining a master's degree: 88 pages, 6 table, 42 figures, 22 sources.

The purpose of the work is improving the availability, efficiency and security of computer networks.

The object of research is means of access to computer network resources.

The subject of research is computer networks.

In the master's thesis, models and methods of access control to the physical environment of wireless computer networks with improved characteristics were developed and improved. The specifics of managing access to resources of wireless computer networks are determined. A model of the analysis of modes of access to the physical environment based on the change of parameters has been developed. The improved method of distributed access to the physical environment with priority service based on adaptive regulation of the number of access categories provides increased performance of the wireless network at the MAC level.

KEY WORDS: COMPUTER NETWORKS, WIRELESS COMPUTER NETWORKS, SIMULATION MODEL OF MASS SUB-LEVEL, METHODS OF ACCESS TO THE PHYSICAL ENVIRONMENT

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 9 |
| РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ БЕЗПРОВОДОВИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ, МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ДОСТУПУ ДО РЕСУРСІВ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ | 11 |
| 1.1 Режими роботи безпроводових мереж на МАС-підрівні | 11 |
| 1.2 Доступ до фізичного середовища на МАС-підрівні | 14 |
| 1.2.1. Схема розподіленого управління доступом..... | 16 |
| 1.2.2 Схема гібридного управління доступом | 18 |
| 1.3 Методи підвищення ефективності роботи МАС-підрівня безпроводових мереж | 22 |
| РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ МАС-ПІДРІВНЯ БЕЗПРОВОДОВОЇ МЕРЕЖІ | 25 |
| 2.1 Аналіз предметної області дослідження | 25 |
| 2.2 Верифікація результатів роботи імітаційної моделі МАС- підрівня..... | 28 |
| 2.2.1 Верифікація за допомогою аналітичних моделей | 28 |
| РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ РОБОТИ МАС-ПІДРІВНЯ БЕЗПРОВОДОВОЇ МЕРЕЖІ | 40 |
| 3.1 Дослідження загальної пропускної здатності безпроводової мережі..... | 40 |
| 3.2 Вплив співвідношення трафіків на продуктивність роботи безпроводової мережі | 50 |
| 3.3 Дослідження забезпечення безпроводовою мережею якості передачі високопріоритетного трафіку | 56 |
| РОЗДІЛ 4 ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ДОСТУПУ ДО ФІЗИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА З ПРІОРИТЕТНИМ ОБСЛУГОВУВАННЯМ | 63 |
| 4.1 Вибір та обґрунтування чинників механізму прийняття рішень адаптивного алгоритму регулювання числа категорій доступу схеми EDCA..... | 63 |
| 4.2 Алгоритм роботи схеми адаптивного вибору числа категорій доступу для схеми EDCA..... | 73 |
| 4.2.1 Діаграма станів модифікованої схеми EDCA при передачі кадру..... | 73 |
| 4.2.2 Адаптивний алгоритм зміни числа категорій доступу схеми EDCA при передачі кадру..... | 75 |
| 4.3 Аналіз роботи схеми адаптивного вибору числа категорій доступу для схеми EDCA..... | 80 |
| ВИСНОВКИ..... | 87 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ..... | 89 |

ВСТУП

Сьогодні важко уявити без існування безпроводового зв'язку. Сфери діяльності людства дедалі тісніше переплітаються з інформаційними технологіями, зокрема й з засобами безпроводового зв'язку, який, в свою чергу, дає можливість інформаційним технологіям бути мобільними, не залежати від конкретного місця перебування та бути доступними будь-де та будь-коли.

За останні десятиліття-два безпроводовий зв'язок набув стрімкого розвитку. Швидкість передачі сигналів за цей час зросла в сотні разів. Тим не менше, реальна пропускна здатність безпроводових мереж, вимірювана на каналному рівні, значно нижча.

Безпроводове середовище передачі є спільним для усіх вузлів мережі, тому для забезпечення рівноправного доступу до фізичного середовища використовуються конкурентні методи доступу. В умовах конкуренції та використання спільного середовища суттєвий вплив на ефективність роботи безпроводових мереж мають процеси, які відбуваються на підрівні доступу до фізичного середовища. Оскільки значним недоліком безпроводових мереж є неможливість вузлом мережі “відчутти” колізію при передачі кадру у ефірі, в основу методу розподіленого доступу до фізичного середовища було закладено метод запобігання колізії (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA), який, в свою чергу, є модифікацією методу доступу до середовища з виявленням колізії (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) раніше широко використовуваного в проводових мережах. Часові витрати, закладені в методі доступу CSMA/CA, викликані необхідністю прослуховування каналу, передачею службових кадрів і використанням для цього спеціальних міжкадрових проміжків, а також очікуванням станціями протягом випадкового інтервалу часу при вирішенні конфліктів, призводять до того, що навіть “ідеальний” безшумний канал зазвичай використовується неефективно. Більше того, при подальшому

збільшенні швидкості передачі протокол управління доступом до середовища стає вузьким місцем усієї системи, не дозволяючи отримати суттєвий приріст пропускної здатності навіть при використанні найефективніших технологій фізичного рівня. Наприклад, при функціонуванні безпроводової мережі згідно специфікації стандарту 802.11n її пропускна здатність практично в п'ять разів нижча, ніж швидкість передачі сигналів.

Важливим завданням, що постає в процесі розвитку безпроводового зв'язку, є підвищення ефективності роботи безпроводових мереж та забезпечення належної якості обслуговування високопріоритетного трафіку шляхом вдосконалення методів управління доступом до спільного фізичного середовища за конкурентних умов та технічних можливостей безпроводових мереж.

Розвиток технічних можливостей безпроводових мереж випереджає впровадження вдосконалень у методи управління доступом до середовища. Це, в сукупності з недоліками нині існуючих методів доступу до фізичного середовища в безпроводових мережах, стає вузьким місцем на шляху розвитку та застосування в безпроводових комп'ютерних мережах інформаційних технологій.

Більшість методів модифікації механізму доступу до середовища присвячена оптимізації початкової ініціалізації одного або кількох ключових параметрів MAC-підрівня станції, не враховують динаміку зміни завантаженості мережі, кількості станцій, різне співвідношення класів трафіку, рівень завад в середовищі. Крім того, впровадження деяких алгоритмів вимагає суттєвих змін існуючих методів доступу до середовища. Це, в свою чергу, може призвести до проблеми сумісності передачі кадрів вузлам мережі, які функціонують згідно стандартних схем доступу до середовища.

Тому актуальним завданням є розроблення та вдосконалення моделей, методів та засобів управління доступом до фізичного середовища безпроводових комп'ютерних мереж з метою підвищення пропускної здатності, зменшення часових затримок та рівня колізій.

1 АНАЛІЗ БЕЗПРОВОДОВИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ, МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ДОСТУПУ ДО РЕСУРСІВ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ

У першому розділі розглянуто схеми розподіленого доступу до середовища на підрівні доступу до середовища передачі даних (Media Access Control, MAC). Також проаналізовано методи модифікації схем розподіленого доступу до середовища для збільшення продуктивності роботи безпроводових мереж. Проведено порівняльний аналіз найбільш доступних методів дослідження роботи мережі: аналітичне та імітаційне моделювання.

1.1 Режими роботи безпроводових мереж на MAC-підрівні

Регулювання спільного використання середовища передачі даних визначається на підрівні доступу до середовища передачі даних (MAC). Саме на MAC-підрівні встановлюються правила сумісного використання середовища передачі даних одночасно декількома вузлами безпроводової мережі.

На MAC-підрівні визначаються два основних режими роботи безпроводових мереж – Ad Hoc та Infrastructure Mode.

В режимі Ad Hoc (рисунок 1.1), який називають також Independent Basic Service Set (IBSS) або режимом Peer to Peer (точка-точка), станції безпосередньо взаємодіють між собою. Для цього режиму потрібен мінімум устаткування: кожна станція повинна бути оснащена безпроводовим адаптером. При такій конфігурації не вимагається створення мережевої інфраструктури. Основними недоліками режиму Ad Hoc є обмежений діапазон дії можливої мережі і неможливість підключення до зовнішньої мережі (наприклад, до Інтернету).

В режимі Infrastructure Mode (рисунок 1.2) станції взаємодіють між собою не напряму, а через точку доступу (Access Point, AP), яка виконує в безпроводовій мережі роль своєрідного концентратора (аналогічно тому, як це відбувається в

традиційних кабельних мережах). Розглядають два режими взаємодії з точками доступу – BSS (Basic Service Set) і ESS (Extended Service Set). В режимі BSS всі станції зв'язуються між собою тільки через точку доступу, яка може виконувати також роль моста до зовнішньої мережі. В розширеному режимі ESS існує інфраструктура декількох мереж BSS, причому самі точки доступу взаємодіють між собою, що дозволяє передавати трафік від однієї BSS до іншої. Між собою точки доступу з'єднуються за допомогою або сегментів кабельної мережі, або радіомостів.

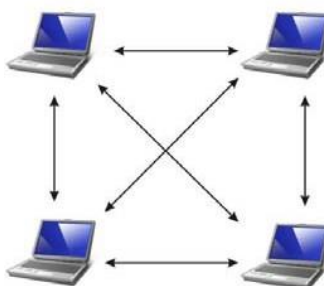


Рисунок 1.1 – Режим функціонування Ad Hoc

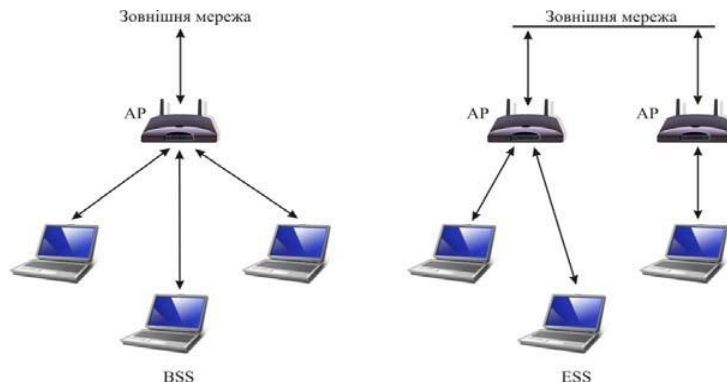


Рисунок 1.2 – Режим функціонування Infrastructure Mode

Окрім двох різних режимів функціонування безпроводових мереж на MAC-підрівні визначено правила колективного доступу до середовища передачі даних. Необхідність існування таких регламентуючих правил цілком очевидна. Уявімо собі ситуацію, коли кожен вузол безпроводової мережі, не дотримуючись жодних правил, став би передавати дані в ефір. В результаті інтерференції декількох сигналів даних вузли, яким призначалась відправлена інформація, не змогли б не тільки її отримати, але і зрозуміти, що дана інформація адресована їм. Саме тому,

необхідне існування жорстких регламентуючих правил, які визначали б колективний доступ до середовища передачі даних.

1.2 Доступ до фізичного середовища на MAC-підрівні

Однією з функцій MAC-підрівня є забезпечення розподіленого доступу до фізичного середовища, що дозволяє станціям мережі обмінюватись інформацією. Один з найпоширеніших стандартів безпроводових мереж IEEE 802.11 часто порівнюють зі стандартом проводових Ethernet-мереж IEEE 802.3, оскільки обидва базуються на методі множинного доступу з прослуховуванням несучої (CSMA), коли станції мають право передавати, якщо середовище є вільним, та відтермінують передачу, якщо середовище зайняте. Проте, різні фізичні середовища передачі даних зумовлюють деякі відмінності в методах доступу до фізичного середовища в проводових та безпроводових мережах.

Згідно Ethernet-стандарту доступу до середовища, станція спершу очікує, коли середовище звільниться, далі розпочинає передачу, та, у разі виникнення колізії під час передачі, зупиняє передачу та запускає відлік випадкового проміжку затримки. В безпроводовому середовищі передавач не в змозі виявити колізію, тому станція намагається уникнути колізії. Відчувши, що середовище вільне, станція очікує протягом випадкового проміжку, під час якого середовище залишається вільним; якщо після цього проміжку середовище все ще є вільним, станція розпочинає передачу. Випадковий проміжок зменшує ймовірність виникнення колізії, оскільки інші станції, які мають намір розпочати передачу, швидше за все очікуватимуть протягом різних випадкових проміжків.

Оскільки безпроводове середовище сильно відрізняється від проводового, тому необхідно враховувати такі його особливості:

- безпроводове середовище схильне до помилок, тому для безпроводових мереж важливі малий час очікування та наявність механізму виправлення помилок;

- в безпроводовому середовищі не всі станції можуть “чути” одна одну (проблема прихованого вузла);

- швидкість передачі, яку може забезпечити канал, сильно залежить від відстані та перешкод на шляху сигналу. Крім того, умови каналу можуть змінюватись з часом через зміни в оточуючому середовищі чи за рахунок мобільності станції. Станціям необхідно постійно коригувати швидкість передачі даних, щоб оптимізувати пропускну спроможність;

- оскільки безпроводові мережі передбачають мобільність станцій, то необхідний механізм управління для з'єднання та роз'єднання з точками доступу при зміні місцезнаходження станції.

В стандарті IEEE 802.11 [5] доступ до фізичного середовища забезпечується базовою схемою розподіленого управління (Distributed Coordination Function, DCF) (рисунок 1.3), яка базується на методі множинного доступу з прослуховуванням несучої та запобіганням колізій (CSMA/CA).

Додатково в мережах з точкою доступу стандарт передбачає використання схеми централізованої координації (Point Coordination Function, PCF), яка дозволяє управляти колективним доступом до фізичного середовища. У зв'язку зі складністю налаштування функції PCF мало хто з виробників безпроводового обладнання підтримує її в своїх продуктах.

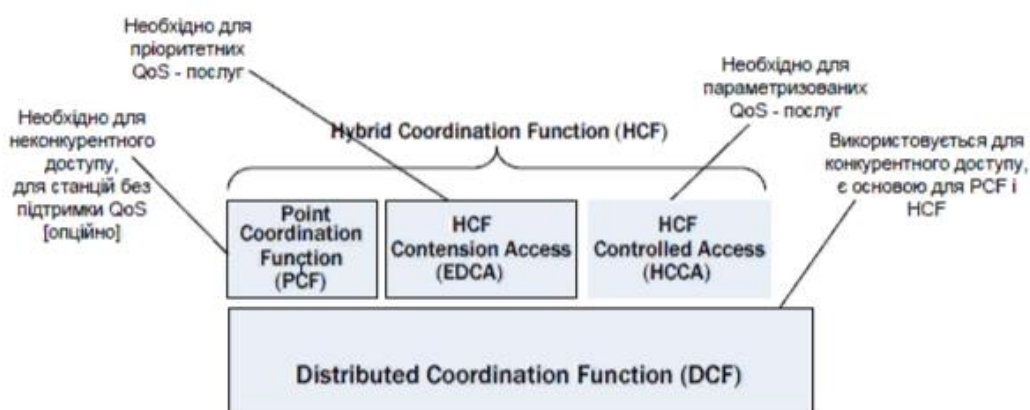


Рисунок 1.3 – Архітектура MAC-підрівня

1.2.1 Схема розподіленого управління доступом

Функція DCF використовує два механізми для передачі кадру. Один з них є базовим, згідно якого, якщо протягом міжкадрового інтервалу (Distributed InterFrame Space, DIFS) та випадкового проміжку відтермінування станція фіксує незайнятість каналу, вона одразу передає кадр. У випадку успішної передачі станція-отримувач після короткого міжкадрового інтервалу (Short InterFrame Space, SIFS) у відповідь надсилає повідомлення ACK (Acknowledgement).

Для забезпечення стабільності роботи мережі функція використовує метод двійкового експоненційного відтермінування. При кожній передачі кадру величина проміжку відтермінування рівномірно вибирається з інтервалу $(0, W - 1)$, де W – вікно конкуренції, вимірюється у слотах часу довжиною σ та залежить від кількості і невдалих передач кадру. Під час першої спроби передачі W встановлюється рівним CW_{min} – мінімальне вікно конкуренції. Після кожної невдалої передачі W подвоюється, тобто $W_i = 2^i W$, і так до досягнення максимальної величини $CW_{max} = 2^m W$, де m – максимальна кількість повторних передач. Лічильник проміжку відтермінування зменшується, доки канал є вільним, і “заморожується”, коли виявляється передача в каналі (рисунок 1.4). Лічильник відтермінування знову починає зменшуватись, коли канал сприймається вільним протягом часу більшого за DIFS. Станція робить спробу передачі, коли лічильник відтермінування зменшується до нуля.

Двійкове експоненційне відтермінування дозволяє впоратися зі значним навантаженням. Постійні спроби передачі, які закінчуються колізією, призводять до збільшення часу очікування, що, в свою чергу, згладжує навантаження. Без подібного відтермінування може відбутись наступне: дві або більше станції одночасно намагаються розпочати передачу, що призводить до колізії, станції негайно намагаються передати кадри повторно, виникає нова колізія і т.д.

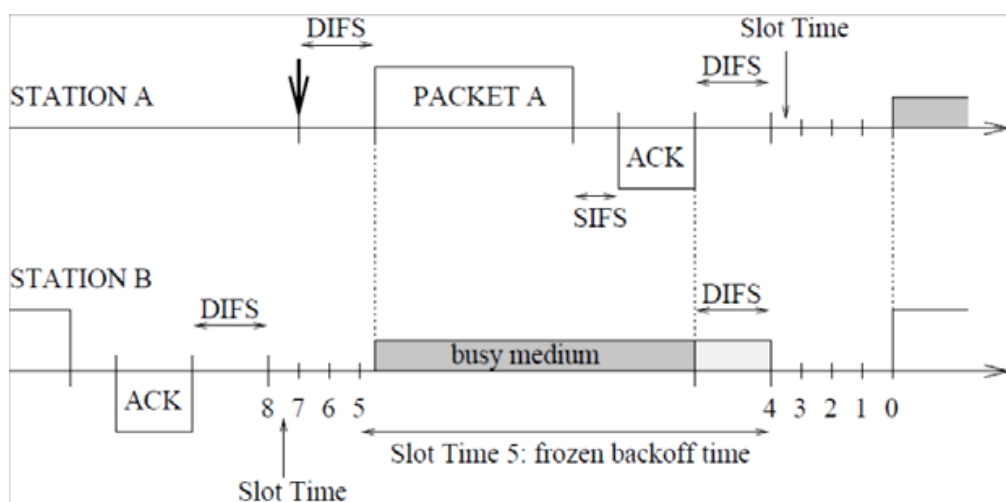


Рисунок 1.4 – Приклад роботи базового механізму доступу

Додатково до базового механізму використовується механізм Request-To-Send/Clear-To-Send (RTS/CTS). Перш ніж передавати кадр, станція “резервує” канал, надсилаючи спеціальне коротке повідомлення RTS. Отримавши таке повідомлення, станція-отримувач надсилає у відповідь повідомлення CTS. Після такого “рукостискання” відбувається передача кадру та повідомлення ACK про успішний прийом у відповідь. Цей механізм дозволяє уникнути проблему “прихованого вузла” (рисунок 1.5), коли точка доступу “чує” STA 1 та STA 2, проте обидві станції одна одну чути не можуть та, відповідно, фізично визначати, що середовище зайняте.

Якщо STA 1 передає кадр, при використанні механізму RTS/CTS STA 2, отримавши кадр CTS від точки доступу, знатиме, протягом якого часу середовище буде зайнятим.

До переваг використання RTS/CTS можна віднести ту обставину, що станція, яка відправила RTS та не отримала CTS у відповідь, економить час та передає повторно лише короткий кадр RTS замість великого кадру даних.

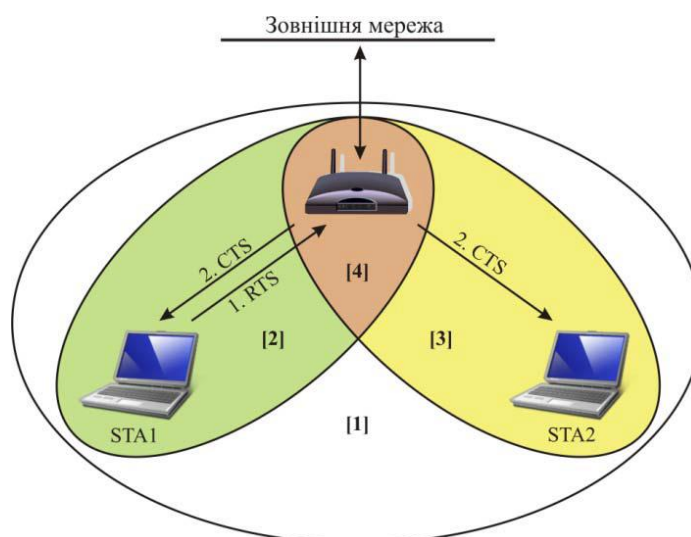


Рисунок 1.5 – Проблема прихованого вузла. 1 – зона базового обслуговування; 2 – зона роботи станції 1; 3 – зона роботи станції 2; 4 – зона можливого виникнення завад при одночасній передачі станцією 1 та станцією 2.

1.2.2 Схема гібридного управління доступом

Зі швидким ростом популярності мультимедійних ужитків, таких як інтернет-телефонія та відео-конференції, які є надзвичайно чутливими до затримок передачі даних, безпроводові мережі з базовою схемою доступу DCF зіштовхнулись з рядом її недоліків:

- за великої кількості станцій і одночасної їх спроби отримати доступ до середовища виникає велика кількість колізій, що призводить до зменшення доступності смуги пропускання;
- відсутність розбиття трафіку на такий, що має високий та низький пріоритет;
- коли станція отримує доступ до середовища, вона займає його на той час, який потрібен для передачі її кадру. Чим нижча швидкість передачі станції, тим довше передаватиметься кадр і, відповідно, тим довше середовище буде зайнятим.

В більшості досліджень, спрямованих на розв'язок цих проблем, за основу взято поділ трафіку за пріоритетом. Як наслідок, спершу в стандарті 802.11e, а

далі і в стандарті 802.11n введено гібридну схему управління (Hybrid Coordination Function, HCF) (рисунок 1.3). Ця функція регламентує два методи доступу до середовища, подібно до базової схеми DCF:

- контроль доступу до каналу (HCF Controlled Channel Access, HCCA) для вільного від конкуренції доступу;
- покращений розподілений доступ до каналу (Enhanced Distributed Channel Access, EDCA) для конкурентного доступу.

Схема EDCA є розширенням базової схеми DCF та призначена для підтримки класів якості обслуговування (Quality of Service, QoS). В схемі EDCA визначено чотири категорії доступу (Access Category, AC). Кожна категорія доступу AC характеризується власною множиною параметрів доступу та пріоритетом доступу до фізичного середовища. Між класами трафіку, які визначені стандартом 802.1D, та категоріями доступу існує перетворення (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Перетворення між класами трафіку

| Пріоритет | 802.1D користувачський пріоритет | 802.1D тип трафіку | Категорія доступу |
|-----------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Найнижчий | 1 | БК (фон) | AC_БК (фон) |
| | 2 | - | |
| | 0 | BE (найкращі зусилля) | AC_BE (найкращі зусилля) |
| | 3 | EE (максимальні зусилля) | |
| | 4 | CL (контрольоване навантаження) | AC_VI (відео) |
| | 5 | VI (відео) | |
| Найвищий | 6 | VO (голос) | AC_VO (голос) |
| | 7 | NC (керування мережею) | |

Для кожної категорії доступу існує своя черга передачі кадрів, визначені свої міжкадрові проміжки (Arbitration Interframe Space, AIFS), аналогічні DIFS, але різної тривалості, крім того, змінюється і розмір вікна конкуренції. Кожна з черг опрацьовується незалежно одна від одної.

Якщо для двох (або більше) кадрів з різних черг однієї станції проміжки відтермінування одночасно стають рівними нулю, то внутрішня колізія вирішується наданням права на передачу кадру з найвищим пріоритетом, решта кадрів опрацьовується як при виникненні зовнішньої колізії. Таким чином трафік

з вищим пріоритетом має вищий шанс бути переданим, ніж трафік з нижчим пріоритетом.

Також для кожної категорії доступу визначено обмежений проміжок ТХОР (Transport Opportunity), протягом якого станція може надсилати будь-яку кількість кадрів, доки цей проміжок не закінчиться. При цьому тривалість передачі не повинна перевищувати максимальний розмір проміжку ТХОР. Якщо кадр за тривалістю передачі не вміщається в один виділений ТХОР, тоді кадр необхідно розбити на менші за розміром кадри. Використання проміжків ТХОР зменшує затримки, пов'язані з боротьбою за доступ до середовища для передачі наступного кадру.

В таблиці 1.2 наведено набір параметрів MAC-підрівня для схеми EDCA в залежності від категорії доступу.

Таблиця 1.2 – Набір параметрів MAC-підрівня для схеми EDCA в залежності від категорії доступу

| | AC0 (AC_BK) | AC1 (AC_BE) | AC2 (AC_VI) | AC3 (AC_VO) |
|------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|
| CWmin | CWmin | CWmin | $(CWmin+1)/2 - 1$ | $(CWmin+1)/4 - 1$ |
| CWmax | CWmax | CWmax | CWmin | $(CWmin+1)/2 - 1$ |
| AIFS | 7 | 3 | 2 | 2 |
| ТХОР (мкс) | 0 | 0 | 3008 | 1504 |

Стандарт 802.11n регламентує блокову передачу (Block ACK) та обов'язкову агрегацію кадрів, оскільки значна частина пропускної спроможності йде на передачу службових заголовків та кадрів підтвердження прийому ACK.

Агрегація кадрів (рисунок 1.6) відбувається шляхом об'єднання двох або більше кадрів, які призначені одному й тому ж адресату, в один великий кадр, з метою зниження в сеансі мережевої роботи числа міжкадрових інтервалів та кадрів ACK. Агрегований кадр (Aggregate MAC Protocol Data Unit, A-MPDU) може мати довжину до 64 Кбайт та складатись з множини традиційних кадрів довжиною від 52 до 2304 байт. При цьому підвищується швидкість передачі даних, оскільки зменшується об'єм службової інформації (заголовки та преамбули кадрів фізичного рівня). Об'єднання кадрів є обов'язковою вимогою, і

лише ті кадри, які потребують індивідуального підтвердження прийому (ACK), можуть передаватися як окремі кадри. Більш того, один A-MPDU може об'єднувати декілька кадрів MSDU (MAC Service Data Unit), які належать різним сервісним потокам (різним ужиткам) та з різними вимогами до якості обслуговування (QoS), вони лише повинні мати єдиного адресата. В результаті формується об'єднаний MAC-кадр A-MSDU.

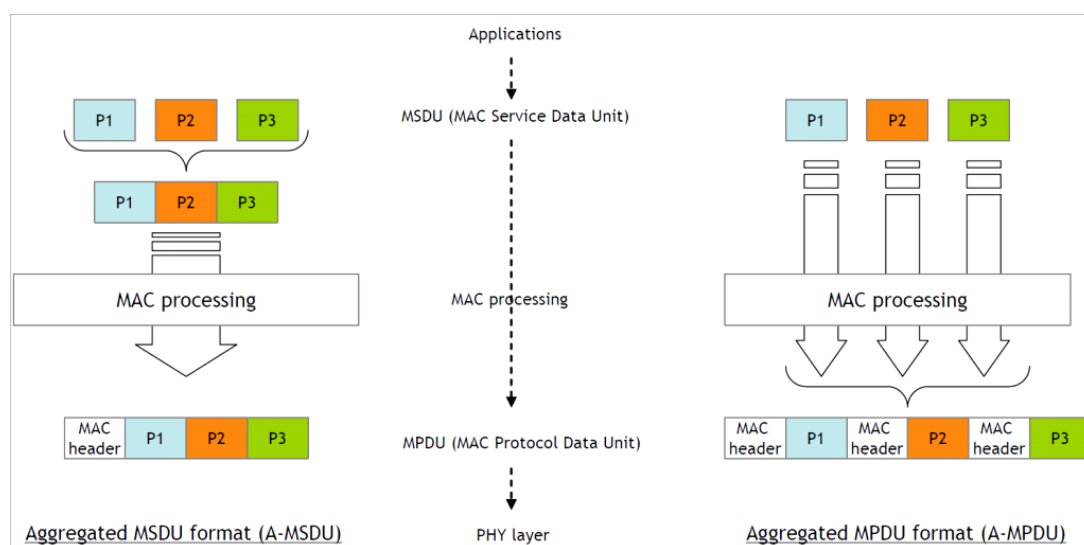


Рисунок 1.6 – Об'єднання кадрів на MAC-підрівні

При використанні протоколу Block ACK прийом множини кадрів підтверджується одним кадром. Цей протокол підвищує ефективність роботи мережі, оскільки усуває підтвердження прийому кожного кадру та більш справедливо розподіляє можливості передачі між станціями з різними швидкостями. Хоча протокол Block ACK було передбачено ще в стандарті 802.11e, він не отримав широкого застосування. З метою підвищення ефективності використання смуги пропускання радіоканалу в стандарті 802.11n кадр Block ACK було зменшено з 128 до 8 байт, причому кожен біт в полі підтвердження цього кадру підтверджує прийом окремого MSDU. Більше того, запит підтвердження (окремий кадр BAR – BA Request) може не використовуватися, замість цього достатньо задати певний тип політики підтвержень.

1.3 Методи підвищення ефективності роботи MAC-підрівня безпроводових мереж

За останні десятиліття-два безпроводовий зв'язок набув стрімкого розвитку. Швидкість передачі сигналів за цей час зросла в сотні разів. Тим не менше, реальна пропускна здатність безпроводових мереж, вимірювана на каналному рівні, значно нижча.

Часові витрати, викликані необхідністю прослуховування каналу, передачею службових кадрів і використанням для цього спеціальних міжкадрових проміжків, а також очікуванням станціями випадкового часу при вирішенні конфліктів, призводять до того, що навіть "ідеальний" безшумний канал зазвичай використовується неефективно. Більше того, при подальшому збільшенні швидкості передачі протокол управління доступом до середовища стає вузьким місцем всієї системи, не дозволяючи отримати суттєвий приріст пропускної здатності навіть при використанні найефективніших технологій фізичного рівня. Наприклад, при швидкості 216 Мбіт/с, використовуючи кадри розміром 1 Кбайт і передачі згідно протоколу IEEE 802.11 (при цьому використовуючи параметри фізичного рівня, закладені в IEEE 802.11n), пропускна здатність обмежена зверху значенням 40 Мбіт/с.

Таким чином, важливою задачею є розробка ефективного протоколу MAC-підрівня, який дозволяє отримати високу пропускну здатність і низьку затримку для кінцевого користувача при роботі в безпроводовій мережі. Розробники IEEE 802.11n підвищують ефективність протоколу MAC-підрівня за допомогою агрегування кадрів, фактично збільшуючи довжини кадрів, які передаються по каналу, залишаючи алгоритм вирішення конфліктів без змін. Для визначення оптимальної довжини агрегованого кадру в залежності від швидкості передачі та рівня завад можна використовувати алгоритм на основі даних про попередню передачу кадру. За умови ненасиченої завантаженості мережі, коли час між надходженням наступного кадру до черги та передачею попереднього кадру є

досить великий, алгоритм працюватиме неефективно, оскільки за цей час стан безпроводового середовища може змінитись, і ця зміна не враховуватиметься при обчисленні оптимальної довжини агрегованого кадру.

Стандартом IEEE 802.11n передбачено три типи агрегації кадрів: A-MSDU, A-MPDU та дворівнева агрегація (поєднання A-MSDU та A-MPDU). При цьому A-MPDU та дворівнева агрегації значно ефективніші за A-MSDU агрегацію. Високопріоритетні кадри (голос та кадри управління) невеликого розміру (80-256 байт), в результаті агрегований A-MSDU кадр теж невеликого розміру, що призводить до неефективного використання каналу. Збільшити ефективність використання каналу можна, ввівши додаткові затримки перед отриманням доступу до середовища та накопичивши кадри для передачі – метод DCA (Delayed Channel Access). Згідно DCA, доступ до середовища відкладається доти, доки в черзі не назбирається визначене число σ кадрів, чи не мине очікувальний часовий проміжок τ з моменту надходження до черги першого кадру, чи доки час з моменту надходження в чергу останнього кадру менше часу λ , необхідного для доступу до середовища. Пізніше в DCA було додано динамічну зміну параметру σ в залежності від розміру черги та інтенсивності надходження кадрів до черги. Також була запропонована функція, яка в залежності від пріоритету кадру та значення параметру λ відправляє кадр або одразу на передачу, або в чергу для агрегації. Як сам алгоритм DCA, так і його модифікації, підвищують ефективність використання каналу та, одночасно, збільшують і час очікування високопріоритетних кадрів в черзі, що є небажаним, оскільки, наприклад, затримка кадрів голосового потоку понад 200 мс спричиняє дискомфорт сприйняття мови співбесідника. Зовсім інший підхід до оптимізації процесу агрегації, де кадри поділяються не лише за класом доступу, а й за адресою. Спеціальний вказівник за довжиною черги, чи випадковим чином, чи згідно якогось іншого алгоритму визначає, з яких черг кадри будуть агреговані та передані. Такий алгоритм потребує додаткових апаратних витрат.

Найбільшим недоліком агрегації є необхідність попередньої буферизації кадрів, яка може збільшувати затримки при їх передачі.

Досліджуючи вплив зміни різних MAC/PHY параметрів на пропускну здатність мережі, можна відзначити, що найбільш вагомий вплив на верхню межу пропускну здатності має довжина слоту часу SlotTime. Оскільки SlotTime є часом, необхідним для оцінки зайнятості каналу, та обумовлюється особливостями фізичного рівня, то цей параметр фактично не піддається зниженню. Проте SlotTime можна спробувати реорганізувати, в деяких роботах запропоновано поділити SlotTime на слот для передачі даних та управляючий слот, який в свою чергу складається з набору міні-слотів. За допомогою управляючого слоту з числа станцій присутніх у мережі в залежності від довжини їх черги обираються ті, яким буде надана можливість конкурувати за доступ до середовища, решта ж станцій залишаються у стані очікування. Проміжок backoff задається кількістю міні-слотів. Після очікування backoff-проміжку станція займає середовище з ймовірністю, яка залежить від довжини черги станції, та за умови, що жодна інша станція не передавала у попередній слот даних. У випадку колізії станція виключається з числа конкуруючих за доступ до середовища. Проте автори не запропонували чіткого алгоритму вибору числа станцій для подальшої конкуренції за доступ до середовища, крім того, впровадження потребує значних змін як на MAC-підрівні так і на фізичному рівні.

2 РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ MAC-ПІДРІВНЯ БЕЗПРОВОДОВОЇ МЕРЕЖІ

У другому розділі проведено системний аналіз розробки інформаційної технології симуляції та побудовано її концептуальну модель, яка відображає основні властивості, вид та характер взаємодії складових елементів імітаційної моделі безпроводової мережі на MAC-підрівні. На основі концептуальної моделі, побудованої за допомогою діаграм UML (Unified Modeling Language), розроблено імітаційну модель MAC-підрівня безпроводової мережі. Наведено особливості функціонування імітаційної моделі, які наближають її роботу до реальних умов функціонування MAC- підрівня безпроводових мереж. Крім того проведено оцінку достовірності роботи розробленої імітаційної моделі MAC-підрівня шляхом порівняння результатів її роботи за різноманітних умов з результатами роботи аналітичних моделей, інших симуляторів та з даними фізичних вимірювань

2.1 Аналіз предметної області дослідження

На сучасному етапі розвитку мережі передачі інформації є технічними системами зі складною ієрархічною структурою. При їх проектуванні найбільш гостро постає проблема оцінки ефективності функціонування не лише окремих елементів, але й усієї системи в цілому. Системний підхід у вирішенні даної проблеми дозволяє найбільш повно представити характер взаємодії всіх складових частин з метою оцінки ефективності системи та проведення оптимізації її параметрів.

Сучасні безпроводові мережі зазвичай мають складну, розгалужену структуру, де складовими є сегменти, побудовані за однією з базових топологій. Розглядаючи розгалужені мережі, завжди можливо виокремити подібні сегменти, що, в свою чергу, значно полегшує аналіз подібних мереж передачі даних. В загальному випадку окремий сегмент локальної безпроводової мережі складається

з деякого числа станцій з безпроводовими мережевими адаптерами та точки доступу, яка виконує роль своєрідного концентратора та, за необхідності, забезпечує зв'язок між безпроводовим сегментом та введеною мережею. При цьому окремий сегмент локальної безпроводової мережі може бути організований і без точки доступу, за принципом “кожен з кожним” (Ad Hoc) (рисунок 1.1). При реалізації методу “кожен з кожним” мережеві адаптери мають всенаправлені антени. Мережі такої структури, як правило, не дозволяють організувати зв'язок на великі відстані. Така мережа дієздатна при дальності до 200 м на відкритому просторі та близько 30-50 м в приміщеннях.

Крім того, можлива також повністю безпроводова організація мережі, коли зв'язок між окремими сегментами здійснюється по радіо- чи ІЧ-каналі за допомогою безпроводових мостів, які зв'язують розрізнені частини комп'ютерної мережі.

Оскільки мережі за типом “кожен з кожним” є найпростішими та не дозволяють отримати доступ до інших проводових чи безпроводових сегментів мережі, то розгортають такі мережі досить рідко, здебільшого для обміну даними у випадку, коли немає можливості використовувати точку доступу. З огляду на це, при розробці імітаційної моделі було прийнято, що безпроводова мережа працює у режимі Infrastructure Mode, при якому станції взаємодіють між собою за допомогою точки доступу (рисунок 1.2). Таким чином, задача розробки та аналізу безпроводової комп'ютерної мережі може бути розділена на задачі аналізу та проектування окремих її сегментів. Ці сегменти надалі можуть з'єднуватися за допомогою як проводових, так і безпроводових технологій в розгалуженій комп'ютерній мережі чи виступати як самостійні елементи.

Для проведення дослідження того чи іншого об'єкту необхідно, перш за все, створити адекватну модель функціонування станцій між собою, яка описує реальну взаємодію з потрібним ступенем наближення. Крім розробки моделюючого алгоритму, імітаційне моделювання передбачає також проведення комп'ютерного експерименту та обробку його результатів. Даний вид дослідження описує процеси, які відбуваються в описуваних системах, у вигляді

алгоритмів, які відтворюють в часі елементарні події, складові процеси, зі збереженням їх логічної структури та послідовності перебігу. В реальних системах передачі інформації, та зокрема в локальних безпроводових мережах, стохастичний характер присутніх в середовищі завад, а також непередбачуваний характер повідомлень, що передаються, передбачають широке застосування ймовірнісних моделей. Отже, випадкові процеси імітуються за допомогою спеціальних датчиків випадкових чисел, які дозволяють забезпечити необхідні ймовірнісні розподіли.

На сьогоднішній день найпоширенішим стандартом безпроводових мереж є стандарт 802.11. Оскільки стандартом 802.11 визначено ряд специфікацій, які підтримують різні конфігурації параметрів фізичного, MAC-підрівня та вищих рівнів мережевої моделі OSI, при розробці імітаційної моделі необхідно врахувати різні швидкості передачі даних, які залежать від технології модуляції сигналів на фізичному рівні, та різні схеми доступу до фізичного середовища на MAC-підрівні. Зважаючи на те, що схему доступу DCF можна вважати окремим випадком схеми EDCA, коли увесь трафік мережі належить до одного типу класу трафіка, то в загальному випадку станція безпроводової мережі при передачі функціонуватиме згідно спрощеної діаграми станів, зображеної на рисунку 2.1.

Для кожного кадру, який надійшов у чергу, станція генерує значення лічильника проміжку зворотного відліку backoff (BoF) та переходить в стан прослуховування каналу. За умови вільності каналу станція зменшує лічильник BoF та знову прослуховує канал. Якщо ж під час очікування проміжку backoff канал стане зайнятим, то лічильник BoF заморожується, доки канал не буде вільним. Коли лічильник BoF стане рівним нулю та середовище все ще залишатиметься вільним, то станція переходить в стан перевірки на внутрішню колізію. Серед усіх кадрів, для яких лічильник BoF рівний нулю, станція обирає для передачі кадр з найвищим класом, щодо решти кадрів застосовується механізм запобігання колізій. Станція надсилає службовий кадр RTS та очікує на кадр CTS, тим самим резервуючи канал для передачі свого кадру. Якщо кадр CTS не отримано, то станція застосовує механізм запобігання колізій, інакше – передає

кадр. Кожна передача кадру супроводжується кадром-квитанцією АСК про успішний прийом кадру станцією-адресатом. Якщо АСК не отримано, то станція вважає, що відбулась колізія в середовищі та застосовує механізм запобігання колізій.

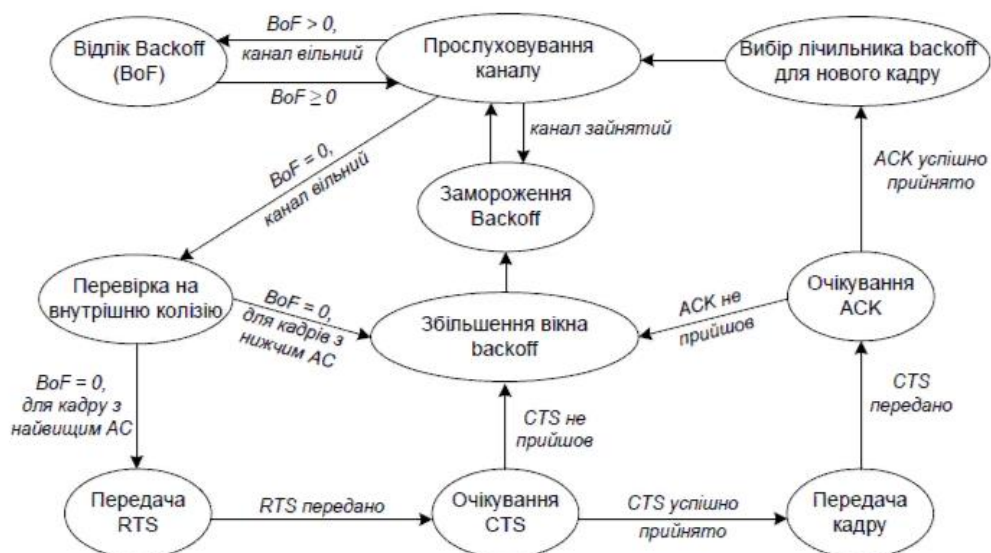


Рисунок 2.1 – Спрощена діаграма станів безпроводової станції на MAC-підрівні

Варто відзначити, що в моделі станів враховано механізм RTS/CTS, за його відсутності станція після прослуховування каналу одразу переходить до передачі даних.

При прийомі станція заморожує лічильник зворотного відліку, якщо в черзі знаходиться кадр для передачі. Успішно прийнявши кадр, станція відсилає кадр-підтвердження АСК.

2.2 Верифікація результатів роботи імітаційної моделі MAC-підрівня

2.2.1 Верифікація за допомогою аналітичних моделей

Для порівняння результатів роботи імітаційної моделі MAC-підрівня були обрані аналітичні моделі, які найбільш повно описують роботу безпроводової

мережі при базовій схемі доступу DCF – та пріоритетній схемі доступу EDCA, а саме: моделі Бьянкі, Даффі, Ханга, Ксяо, Банчса, Енгельштада та Жанга (моделі названі за прізвищем першого автора).

При моделюванні MAC-підрівня безпроводової мережі, яка працює згідно схеми доступу DCF, для усіх моделей були прийняті однакові параметри MAC та фізичного рівнів згідно стандарту 802.11g (таблиця 2.1).

Мережа з насиченою завантаженістю

Для верифікації результатів роботи розробленої імітаційної моделі MAC-підрівня було проведено моделювання MAC-підрівня безпроводової мережі в екстремальних умовах – в насиченому режимі.

Таблиця 2.2 - Параметри MAC та фізичного рівнів стандарту 802.11g

| | |
|---------------------------------|-----------|
| Розмір кадру | 2312 байт |
| MAC-заголовок | 34 байта |
| PHY-заголовок | 32 байта |
| ACK | 14 байт |
| Розмір слоту | 20 мкс |
| SIFS | 10 мкс |
| DIFS | 50 мкс |
| CW_{min} | 31 |
| CW_{max} | 1023 |
| Число повторних передач кадру | 16 |
| Швидкість передачі | 54 Мбіт/с |
| Затримка розповсюдження сигналу | 1 мкс |

На рисунку 2.2 зображено залежність пропускної здатності від кількості станцій, які працюють в насиченому режимі та згідно базового механізму доступу до середовища. Як видно, характер залежності пропускної здатності зі зростанням кількості станцій зберігається для більшості аналітичних моделей та для імітаційної моделі: зростає для невеликої кількості станцій та зменшується з ростом числа станцій в мережі, що пов'язано зі зростанням ймовірності одночасної передачі кадрів декількома станціями та, відповідно, довшим очікуванням станцій на доступ до середовища (рисунок 2.3) в результаті застосування механізму запобігання колізій.

Отримана в результаті роботи розробленої імітаційної моделі MAC-підрівня залежність пропускної здатності мережі від кількості станцій лежить в

межах розкиду аналогічних залежностей знайдених за аналітичними моделями – 50-60 %, та збігається з ними за характером зміни. Розкид значень пропускної здатності для більшості моделей не перевищує 9- 18 %, що є достатньою точністю. Отже, можна вважати, що результати імітаційного моделювання добре узгоджуються з більшістю аналітичних моделей.

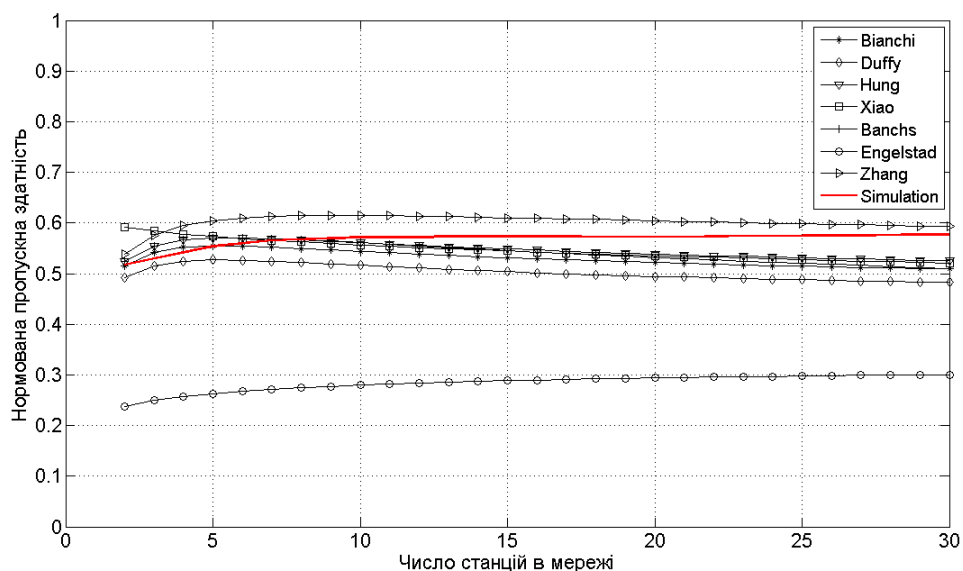


Рисунок 2.2 – Нормована пропускну здатність мережі в насиченому режимі при механізмі доступу до фізичного середовища DCF

При цьому варто відзначити, що для аналітичної моделі Енгельштада спостерігається найбільша різниця значень пропускної здатності мережі та характер її зміни, порівняно з рештою аналітичних моделей, що, швидше за все, зумовлено грубістю прийнятого авторами припущення при розробці моделі. Для врахування AIFS-диференціації між кадрами різних класів, автори ввели поняття додаткових слотів часу та припустили, що додаткові слоти часу рівномірно розподілені серед решти слотів часу. Тоді як в реальності додатковий слот з'являється одразу після іншого додаткового слоту або після успішної чи неуспішної передачі кадру. В результаті такого припущення, аналітична модель має суттєві розбіжності з імітаційним моделюванням при помірній завантаженості мережі.

Крім пропускної здатності було досліджено також середній час доставки кадру. В безпроводовій мережі, яка працює в насиченому режимі, середній час

доставки кадру практично лінійно зростає зі збільшенням числа станцій в мережі (рисунок 2.3). Для моделей Бьянкі, Даффі, Ханга та Енгельштада розкид значень між моделями не перевищує 0.7-2.8 мс, при цьому результати імітаційного моделювання лежать в межах розкиду значень більшості аналітичних моделей. Для моделей Ксяо та Жанга значення середнього часу доставки для числа станцій в мережі більше п'яти різко зростає та майже у три та два рази, відповідно, перевищує значення середнього часу доставки для решти моделей у випадку 30 станцій.

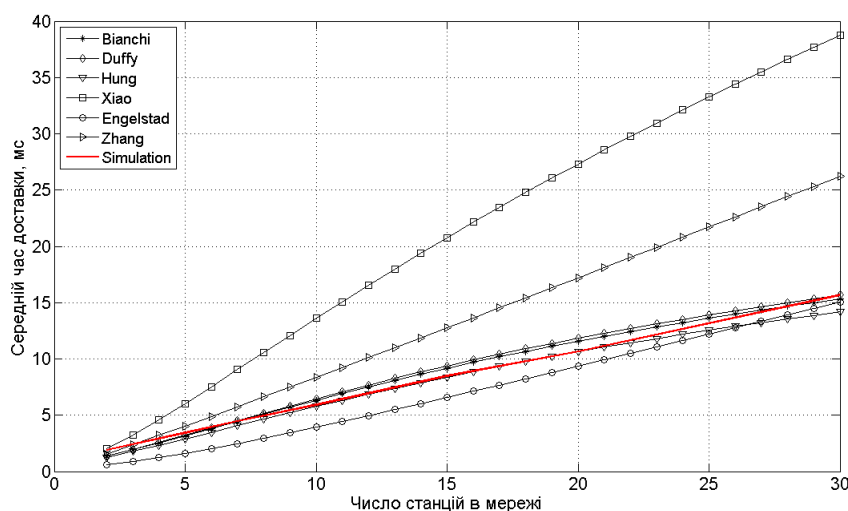


Рисунок 2.3 – Середній час доставки кадрів в мережі з насиченою завантаженістю при механізмі доступу до фізичного середовища DCF

Аналогічні експерименти були проведені і для випадку роботи безпроводової мережі згідно схеми доступу EDCA. Увесь трафік рівнопропорційно поділявся на чотири класи з різними пріоритетами. Для кожної черги класу доступу визначено власний набір параметрів MAC- підрівня (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 - Параметри MAC-підрівня для категорій доступу

| | AC0 | AC1 | AC2 | AC3 |
|-------------------|------|------|-----|-----|
| CWmin | 31 | 31 | 15 | 7 |
| CWmax | 1023 | 1023 | 31 | 15 |
| AIFS (мкс) | 150 | 70 | 50 | 50 |

На рисунку 2.4 зображено нормовану пропускну здатність мережі згідно механізму доступу EDCA для високопріоритетних класів доступу AC2 і AC3

(рисунок 2.4а) та для низькопріоритетних – AC0 і AC1 (рисунок 2.4б). Для усіх залежностей можна виділити спадний характер пропускної здатності зі збільшенням кількості станцій в мережі.

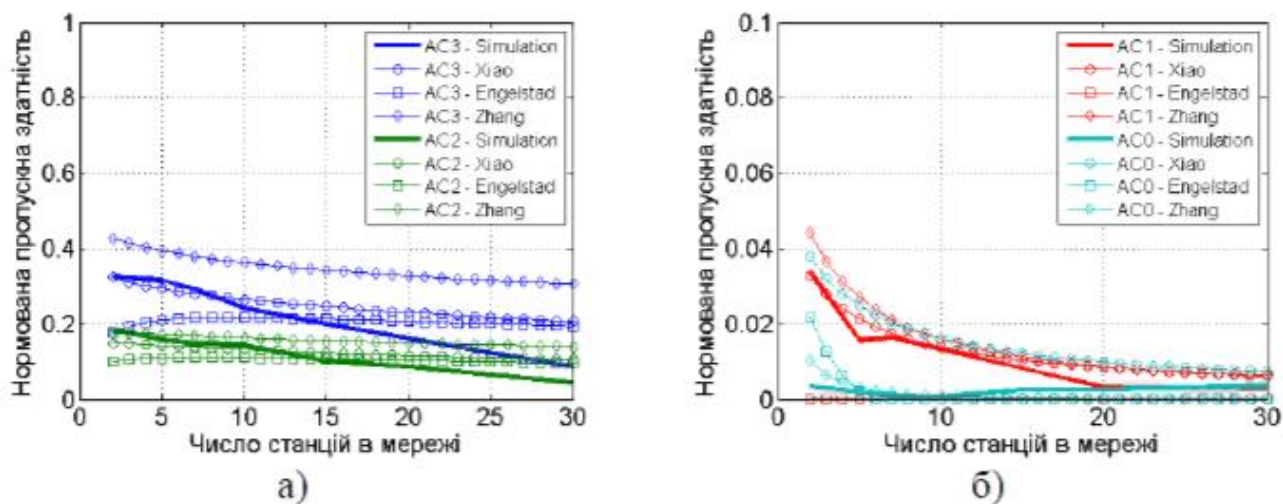


Рисунок 2.4 – Нормована пропускна здатність мережі в насиченому режимі при механізмі доступу до фізичного середовища EDCA для а) високопріоритетних та б) низькопріоритетних класів доступу

Результати значень пропускної здатності мережі для різних аналітичних моделей відрізняються між собою, особливо для високопріоритетного трафіку (AC3) (рисунок 2.4а).

Для класів доступу AC0 та AC1 пропускна здатність є найнижчою та становить 0.5-4 % від швидкості передачі (рисунок 2.4б), оскільки кадри класів доступу AC2 та AC3 швидше отримують доступ до середовища та мають вищий пріоритет при вирішенні внутрішньої колізії між кадрами з різних черг. Результати, отримані за допомогою розробленої імітаційної моделі MAC-підрівня, лежать в межах результатів аналітичних моделей.

Для класів доступу AC2 та AC3 (рисунок 2.4а) результати розробленої імітаційної моделі MAC-підрівня для кількості станцій < 14 лежать в границях розкиду значень пропускної здатності аналітичних моделей – 13-25 % для класу доступу AC3, та 4-9 % для класу доступу AC2. Для більшого числа станцій пропускна здатність мережі імітаційної моделі зменшується сильніше, ніж у

випадку аналітичного моделювання, проте різниця значень між імітаційною моделлю та аналітичними не є більшою, ніж різниця значень аналітичних моделей. Так, у випадку 30 станцій для класу доступу AC3 різниця значень пропускної здатності аналітичних моделей Жанга та Енгельштада становить 0.11, тоді як різниця значень розробленої імітаційної моделі MAC-підрівня та моделі Енгельштада – 0.1. Це може бути зумовлено нюансами функціонування безпроводової мережі в розробленій імітаційній моделі та аналітичних моделях. В імітаційній моделі реалізовано режим Infrastructure Mode, коли усі станції взаємодіють між собою за допомогою точки доступу, тоді як в аналітичних моделях станції взаємодіють між собою напряму – режим Ad Hoc. В режимі Infrastructure Mode точка доступу бореться за доступ до середовища нарівні зі станціями, тобто ймовірності отримання доступу до середовища для точки доступу та станції однакові. Збільшуючи кількість станцій в мережі, збільшується ймовірність доступу до середовища серед станцій та ймовірність того, що точка доступу працюватиме на прийом кадрів, а не на його передачу. Зобразивши окремо пропускну здатність точки доступу та усереднену пропускну здатність станції (рисунок 2.5), видно, що пропускну здатність точки доступу майже не поступається пропускну здатності станції, хоча теоретично пропускну здатність точки доступу мала б дорівнювати сумарному трафіку усіх станцій. Це говорить про рівну ймовірність отримання права на передачу як точкою доступу, так і однією зі станцій. Таким чином, зі зростанням числа станцій середовище здебільшого зайняте передачею кадрів від станцій до точки доступу.

Аналізуючи середній час доставки при механізмі доступу до фізичного середовища EDCA (рисунок 2.6), можна помітити значну різницю значень для різних моделей, яка зростає зі збільшенням станцій в мережі. Результати імітаційного моделювання лежать в межах розкиду значень аналітичного моделювання.

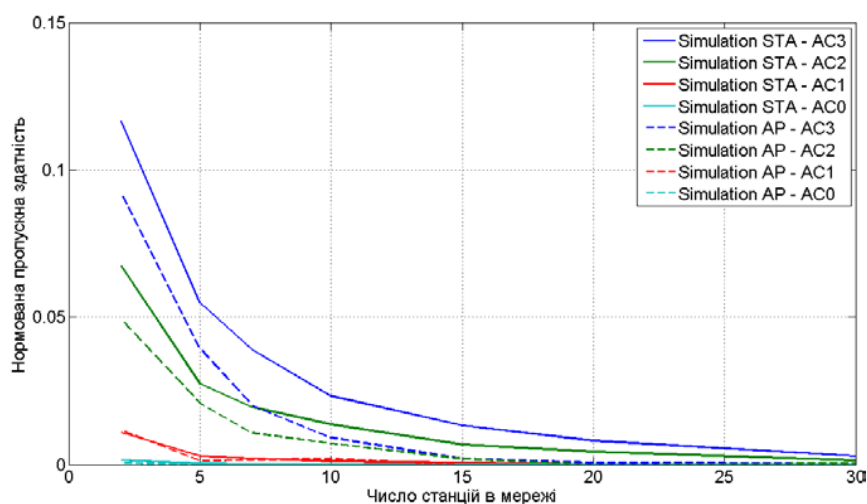


Рисунок 2.5 – Нормована пропускна здатність точки доступу та станції в насиченому режимі при механізмі доступу до фізичного середовища EDCA

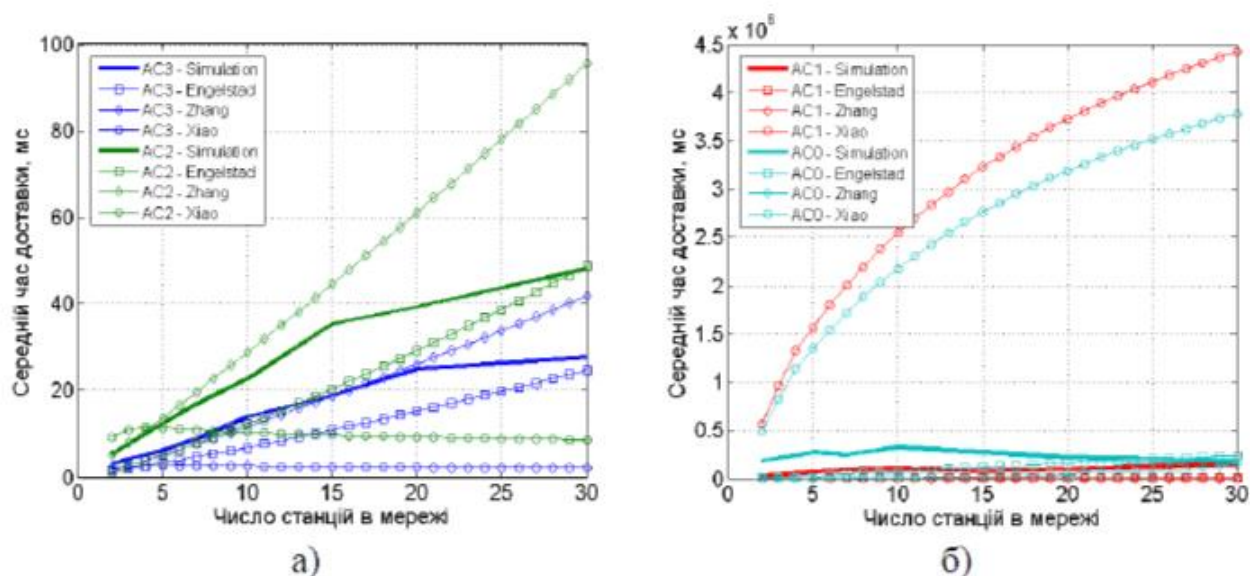


Рисунок 2.6 – Середній час доставки кадрів в мережі з насиченою завантаженістю при механізмі доступу до фізичного середовища EDCA для а) високопріоритетних та б) низькопріоритетних класів доступу

Крім того, відзначимо, що сумарна пропускна здатність безпроводової мережі згідно схеми доступу EDCA нижча, ніж згідно схеми доступу DCF (рисунок 2.7). При цьому чим більше станцій в безпроводовій мережі, тим меншу пропускну здатність забезпечує схема доступу EDCA в насиченому режимі, в порівнянні зі схемою доступу DCF.

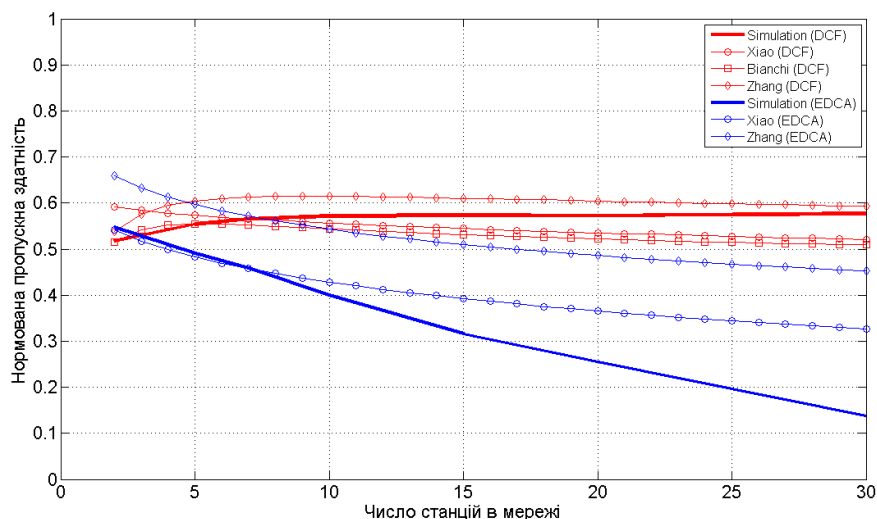


Рисунок 2.7 – Загальна нормована пропускна здатність у випадку насиченої завантаженості

Отже, схема доступу EDCA, забезпечуючи якість обслуговування трафіку високопріоритетних класів доступу, при насиченій завантаженості та великій кількості станцій в мережі менш ефективна в цілому, порівняно зі схемою доступу DCF. Оскільки в чергах станцій завжди присутні кадри для передачі, в цьому випадку право на передачу з більшою ймовірністю отримують кадри з вищим класом доступу. Ймовірність передачі кадрів нижчого класу доступу збільшується у випадку, коли внаслідок колізії мінімальне вікно конкуренції для високопріоритетних класів доступу значно більше, ніж мінімальне вікно конкуренції низькопріоритетних класів доступу. В даній дисертаційній роботі як один з методів підвищення ефективності роботи безпроводової мережі запропоновано метод адаптивного переходу зі схеми доступу EDCA на DCF при високій завантаженості мережі.

Мережа зі змінною завантаженістю

Крім аналізу результатів моделювання роботи MAC-підрівня безпроводової мережі в насиченому режимі, було проведено дослідження роботи безпроводової мережі, в якій завантаженість плавно змінюється від низької до насиченої, та порівняно результати з даними аналітичного моделювання.

На рисунку 2.8 зображено залежність пропускної здатності мережі від її завантаженості. Мережа складається з 10 станцій та однієї точки доступу, які функціонують згідно базового механізму доступу до фізичного середовища (DCF). Параметри MAC та фізичного рівнів наведені в таблиці 2.1.

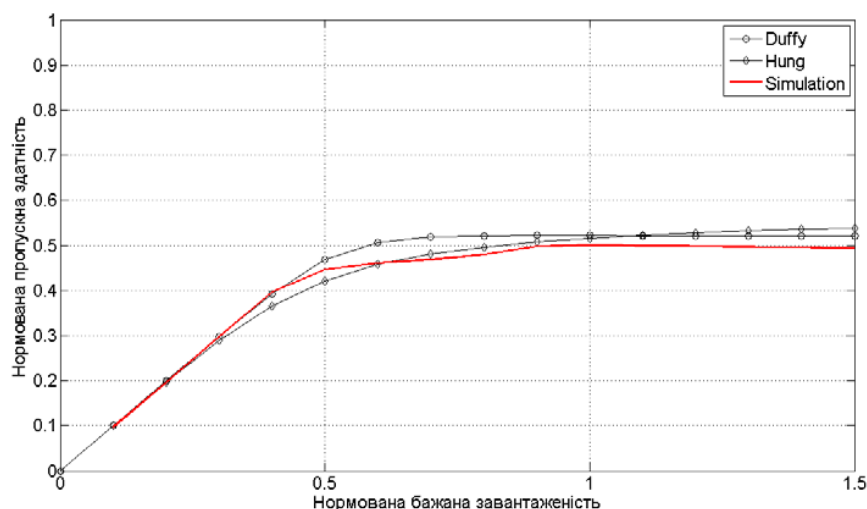


Рисунок 2.8 – Нормована пропускна здатність мережі зі змінною завантаженістю при механізмі доступу до фізичного середовища DCF

Результати імітаційного моделювання досить близько повторюють аналітичні розрахунки для моделей Даффі та Ханга. При завантаженості до 40-50 % мережа фактично повністю з нею справляється, та різниця між результатами імітаційного та аналітичного моделювання не перевищує 3-5 %. Подальше зростання завантаженості мережі призводить до її насиченості, та пропускна здатність не перевищує 50-55 %. Найбільша різниця, близько 10 %, між результатами імітаційного та аналітичного моделювання спостерігається в період насичення мережі.

Середній час доставки кадру зі зміною завантаженості мережі зображено на рисунку 2.9.

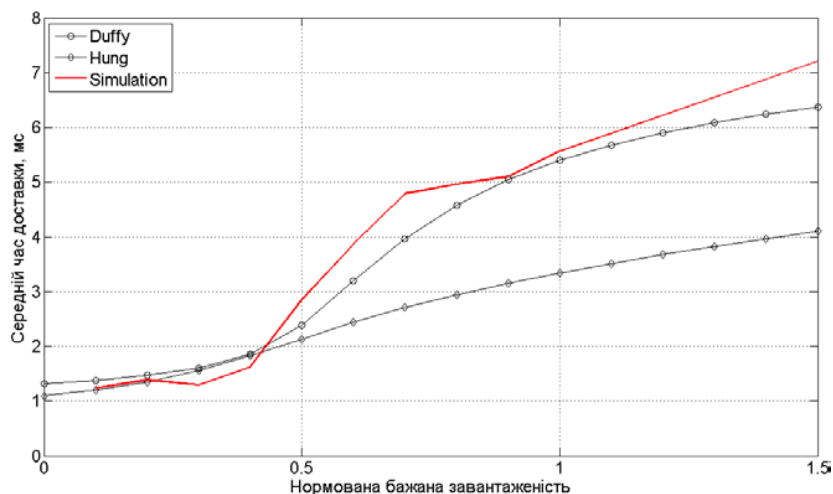


Рисунок 2.9 – Середній час доставки кадрів в мережі зі змінною завантаженістю при механізмі доступу до фізичного середовища DCF

Для моделі Ханга середній час доставки практично лінійно зростає зі збільшенням завантаженості мережі, та ніяк суттєво не змінює лінійний характер зростання з переходом мережі в насичений стан. Для імітаційної моделі та моделі Даффі момент, коли мережа перестає повністю передавати згенерований трафік, є переломним. До цього моменту середній час доставки зростає досить повільно та становить 1-2 мс, тоді як з переходом мережі в насичений стан середній час починає досить стрімко зростати. Як видно з рисунка 2. 9 результати імітаційного моделювання для середнього часу доставки досить добре узгоджуються с результатами моделі Даффі та в середньому різниця між моделями становить близько 10 %.

Результати моделювання для мережі, яка працює згідно механізму доступу до середовища EDCA зображено на рисунках 2.10 та 2.11. Для усіх моделей мережа повністю справляється зі згенерованим трафіком усіх чотирьох класів, якщо при цьому сумарна завантаженість мережі не перевищує 50 %. При більшій завантаженості станції надають перевагу на передачу трафіку з вищим класом доступу, як це і передбачено механізмом доступу EDCA. Для аналітичних моделей у випадку напівнасиченої завантаженості мережі існує неточність обчислень, внаслідок якої перехід мережі з ненасиченого стану в насичений відбувається досить різко.

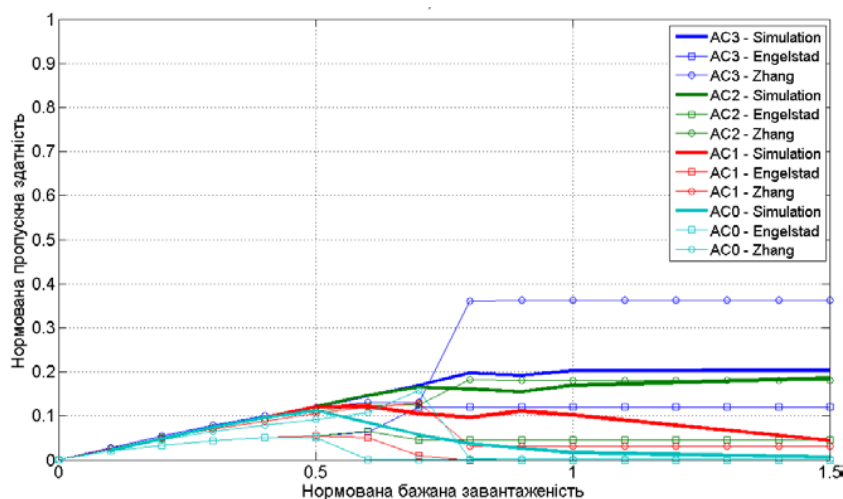


Рисунок 2.11 – Нормована пропускна здатність мережі зі змінною завантаженістю при механізмі доступу до фізичного середовища EDCA

Для базового механізму доступу середній час доставки змінюється в діапазоні від 1-2 мс до 6-7 мс для низької та насиченої завантаженості відповідно. Як видно з рисунка 2.12 середній час доставки при механізмі доступу EDCA суттєво зріс порівняно з базовим механізмом доступу для класів доступу AC0 та AC1. Так, для класу доступу з найвищим пріоритетом AC3 середній час доставки коливається в межах 3-12 мс, а для класу доступу з найнижчим пріоритетом середній час доставки вже на порядок вище 10-200 мс.

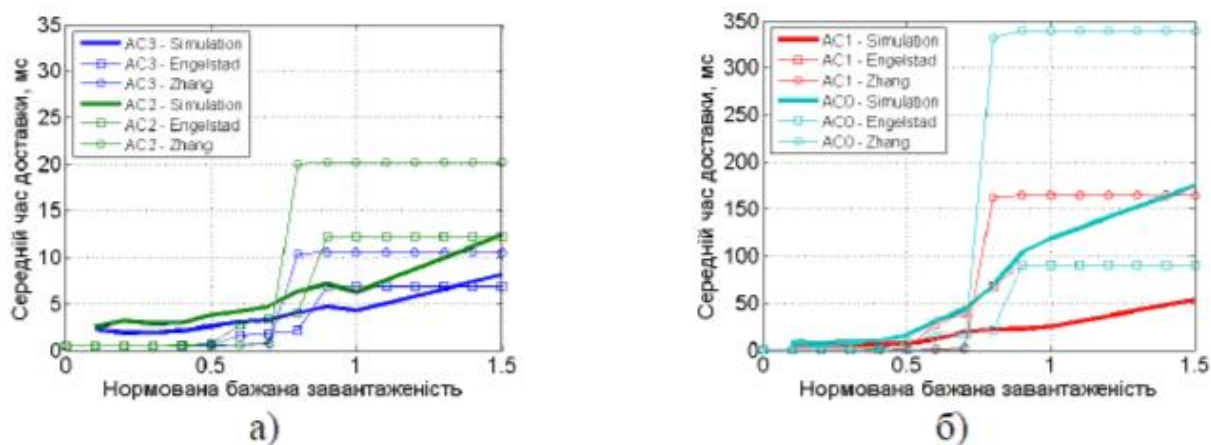


Рисунок 2.12 – Середній час доставки кадрів в мережі зі змінною завантаженістю при механізмі доступу до фізичного середовища EDCA

Таким чином, можна зробити висновок, що для завантаженості мережі до 50 % ефективність роботи механізму доступу EDCA малопомітна, оскільки мережа повністю справляється зі згенерованим трафіком станцій. Проте для високої завантаженості мережі механізм доступу EDCA забезпечує високу пропускну здатність для трафіку з вищим пріоритетом за рахунок довшого обслуговування кадрів з низьким пріоритетом. При цьому сумарна пропускну здатність мережі зберігається на рівні пропускну здатності для механізму доступу DCF (рисунок 2.13).

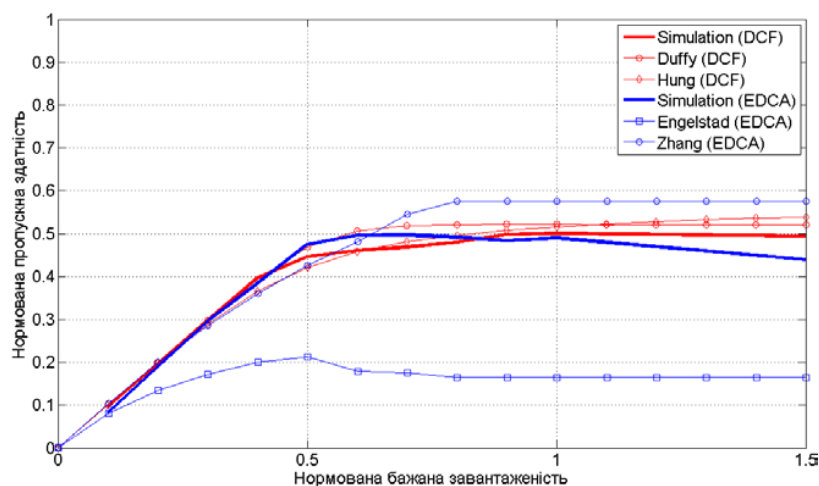


Рисунок 2.13 – Загальна нормована пропускну здатність у випадку змінної завантаженості

Отже, розроблена імітаційна модель MAC-підрівня досить точно узгоджується з аналітичними моделями, різниця результатів моделювання знаходиться в межах 5-15 %, чого цілком достатньо, аби говорити про їх достовірність.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ РОБОТИ MAC-ПІДРІВНЯ БЕЗПРОВОДОВОЇ МЕРЕЖІ

3.1 Дослідження загальної пропускної здатності безпроводової мережі

Як було показано сумарна пропускна здатність насиченої безпроводової мережі зі схемою доступу EDCA та поділом трафіку на чотири категорії доступу нижча, ніж пропускна здатність мережі зі схемою доступу DCF, яка не передбачає пріоритетного поділу трафіку. Дослідимо детальніше характеристики безпроводової мережі за різної завантаженості, та вплив на них застосування схеми доступу EDCA з різним числом категорій доступу.

При моделюванні роботи MAC-підрівня безпроводової мережі за допомогою розробленої імітаційної моделі були встановлені параметри MAC та фізичного рівнів згідно таблиці 3.1.

Схема доступу EDCA за замовчуванням передбачає поділ трафіку на чотири пріоритетні типи: голос (AC_VO), відео (AC_VI), трафік найкращих зусиль (AC_BE) та фоновий трафік (AC_BK), MAC-параметри для яких визначені в таблиці 2.2. Припустимо, що в безпроводовій мережі за умови насиченої завантаженості присутній лише один з чотирьох типів трафіку, та порівняємо результати з результатами, отриманими за допомогою схеми доступу DCF (рисунок 3.1).

Таблиця 3.1 - Параметри MAC та фізичного рівнів для імітаційної моделі MAC-підрівня

| | |
|-------------------------------|-----------|
| Розмір тіла кадру | 2312 байт |
| MAC-заголовок | 34 байта |
| PHY-заголовок | 32 байта |
| АСК | 14 байт |
| Розмір слоту | 20 мкс |
| SIFS | 10 мкс |
| Число повторних передач кадру | 16 |
| Швидкість передачі | 54 Мбіт/с |

З рисунка 3.1 видно, що за умови насиченості, коли в мережі зі схемою доступу EDCA передається лише один тип трафіку, нормована пропускна здатність є нижчою, ніж при застосуванні схеми DCF. При цьому найбільша різниця спостерігається у випадку, коли в мережі передається лише голосовий трафік. Так, у випадку 30 станцій, вона практично вдвічі менше, ніж пропускна здатність для схеми DCF. Пов'язано це з тим, що в насиченому режимі кадри частіше попадають в колізії, в той же час для високопріоритетних кадрів розмір максимального вікна конкуренції вдвічі менший або рівний розміру мінімального вікна конкуренції для низькопріоритетних кадрів. Тобто, при застосуванні механізму запобігання колізії зростає ймовірність, що для двох і більше станцій буде згенеровано однакове значення проміжку відтермінування та попадання високопріоритетних кадрів в наступну колізію.

Різниця між пропускною здатністю для фонових трафіку та трафіку найкращих зусиль є практично однаковою для будь-якого числа станцій в мережі і є наслідком різниці між інтервалами AIFS. Тобто, збільшення інтервалу AIFS з 70 до 150 мкс знижує нормовану пропускну здатність приблизно на 0.05.

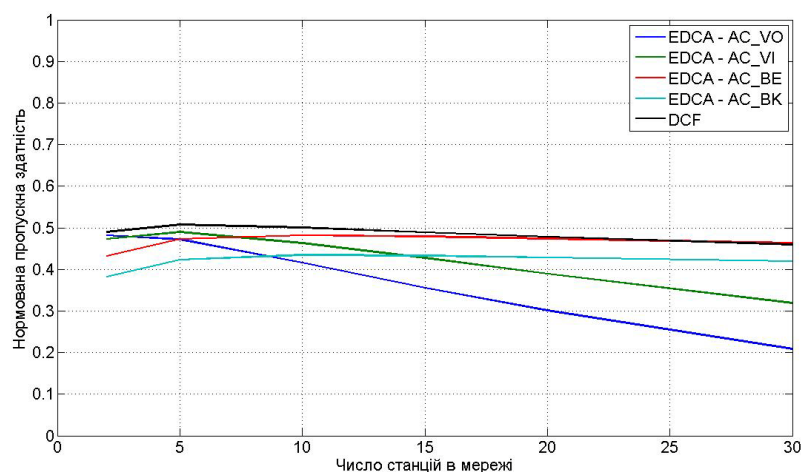


Рисунок 3.1 – Нормована пропускна здатність безпроводової мережі, яка передає один тип трафіку

Дослідимо вплив числа категорій доступу на ефективність роботи схеми EDCA в порівнянні зі схемою DCF за умови насиченості мережі. В дослідженні було використано чотири схеми доступу (таблиця 3.2).

Перша схема не передбачала поділу трафіку за категоріями доступу, а значення мінімального та максимального вікна конкуренції і арбітражного інтервалу були визначені як для схеми доступу DCF.

Друга схема передбачала поділ трафіку на дві категорії доступу: фоновий трафік (AC_BK) та відео (AC_VI), значення мінімального та максимального вікна конкуренції і арбітражного інтервалу були визначені як для категорій доступу AC0 та AC2 (таблиця 2.2). Для третьої схеми трафік поділявся на чотири категорії доступу, згідно стандарту 802.11e (таблиця 2.2). Для четвертої схеми доступу було визначено вісім категорій доступу, які передбачені стандартом 802.1D (таблиця 1.1). В таблиці 3.2 представлені значення MAC-параметрів для усіх чотирьох схем доступу.

Таблиця 3.2 - Схеми поділу трафіку на категорії доступу

| | Схема 1 | | Схема 2 | | Схема 3 | | | | Схема 4 | | | |
|------------|---------|-----|---------|-----|---------|------|-----|-----|---------|-------|-------|-------|
| | AC0 | AC1 | AC0 | AC1 | AC0 | AC1 | AC2 | AC3 | AC0,1 | AC2,3 | AC4,5 | AC6,7 |
| CWmin | 31 | 15 | 31 | 15 | 31 | 31 | 15 | 7 | 31 | 31 | 15 | 7 |
| CWmax | 1023 | 31 | 1023 | 31 | 1023 | 1023 | 31 | 15 | 1023 | 1023 | 31 | 15 |
| AIFS (мкс) | 50 | 150 | 50 | 150 | 70 | 50 | 50 | 50 | 150 | 70 | 50 | 50 |

На рисунку 3.2 зображено залежність пропускної здатності від числа станцій в мережі, яка працювала в насиченому режимі. Поряд з результатами імітаційного моделювання представлені залежності пропускної здатності від числа станцій в мережі для аналітичних моделей Ксяю та Енгельштада .

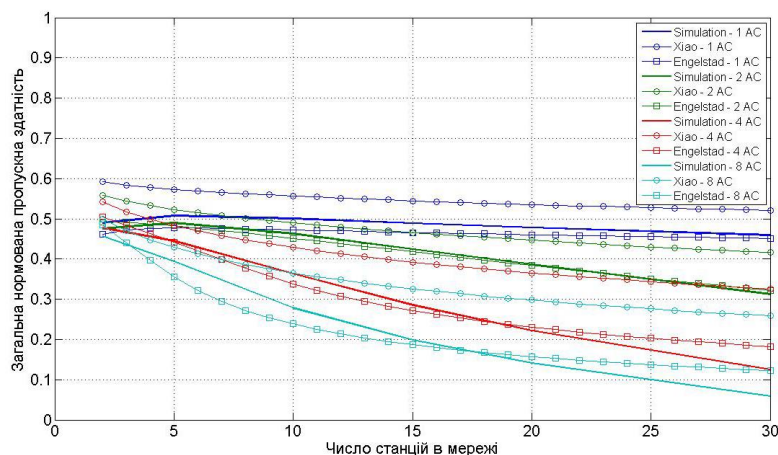


Рисунок 3.2 – Загальна нормована пропускна здатність для чотирьох схем доступу

Для усіх трьох моделей пропускна здатність падає зі збільшенням числа станцій в мережі. Для невеликого числа станцій в мережі загальна нормована пропускна здатність для усіх чотирьох схем поділу трафіку лежить в межах 0.45-0.5. При збільшенні числа станцій в мережі, збільшується різниця значень пропускних здатностей між різними схемами поділу трафіку. Так, для мережі, яка складається з 15 станцій, різниця між схемою без поділу на категорії доступу та схемою з двома категоріями доступу становить приблизно 10%, для схеми з чотирма категоріями доступу загальна пропускна здатність практично в два рази нижча, а для схеми з вісьмома категоріями доступу – в 2.5 рази. Для 30 станцій загальна пропускна здатність для схем з поділом на дві, чотири та вісім категорій доступу нижча, відповідно, в 1.5, 3.7 та 7.9 рази в порівнянні зі схемою без поділу трафіку за категоріями доступу.

Таким чином, можна відзначити, що чим більше в насиченій мережі категорій доступу, тим нижча її загальна пропускна здатність в порівнянні з мережею без поділу трафіку за категоріями доступу, причому зі збільшенням числа станцій загальна пропускна здатність спадає тим стрімкіше, чим більше категорій доступу. Однією з можливих причин такої залежності може бути застосування механізму вирішення внутрішніх колізій. На рисунку 3.3 зображено залежність ймовірності попадання кадру в колізію при передачі від числа станцій в мережі.

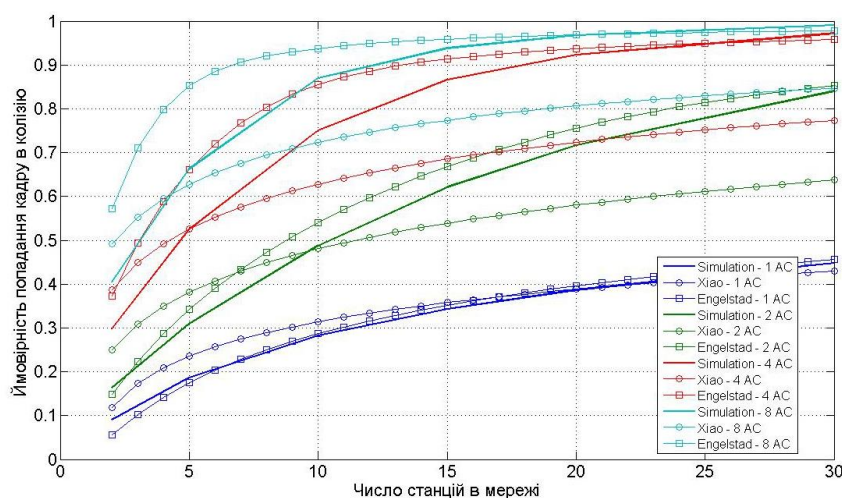


Рисунок 3.3 – Ймовірність попадання кадру в колізію при передачі для чотирьох схем доступу

Ймовірність виникнення колізії при передачі кадру для схеми доступу, яка не передбачає поділ на категорії доступу, практично в два рази нижча, ніж для схеми з чотирма чи вісьмома категоріями доступу. Для великого числа станцій в мережі з числом категорій доступу більшим за чотири ймовірність попадання кадру в колізію наближається до одиниці, таким чином станція спрямовує свої зусилля не на успішну передачу кадру, а на застосування механізму запобігання колізій.

Якщо зобразити пропускну здатність для трафіку кожної категорії доступу (рисунок 3.4), то побачимо, що схема доступу з поділом трафіку на дві категорії доступу (рисунок 3.4а) дозволяє забезпечити першочергове обслуговування високопріоритетних кадрів станцій за умови насиченості мережі. При цьому навіть для великої кількості станцій нормована пропускну здатність для високопріоритетного трафіку становить близько 30%, на відміну від схеми з поділом на чотири категорії доступу, при якій пропускну здатність для високопріоритетного трафіку значно менша (рисунок 3.4б), а для схеми з поділом на 8 категорій доступу – більш ніж вдвічі нижча (рисунок 3.4в).

Схема з чотирма категоріями доступу ефективно надає пріоритетний доступ високопріоритетним кадрам лише для мережі з невеликим числом станцій. З ростом числа станцій в мережі зменшується ефект від застосування поділу трафіку на категорії доступу. На прикладі мережі з 30 станцій нормована пропускну здатність найбільш пріоритетного трафіку не перевищує 10%, в той час, як для схеми з двома категоріями доступу – 30%.

Схема з вісьмома категоріями доступу, в найкращому випадку, коли в мережі лише 2-5 станцій, забезпечує нормовану пропускну здатність для найбільш пріоритетного трафіку на рівні 14-16%. Для більшого числа станцій нормована пропускну здатність є низькою для будь-якого типу трафіку та не перевищує 10%, а для 30 станцій становить лише 2%.

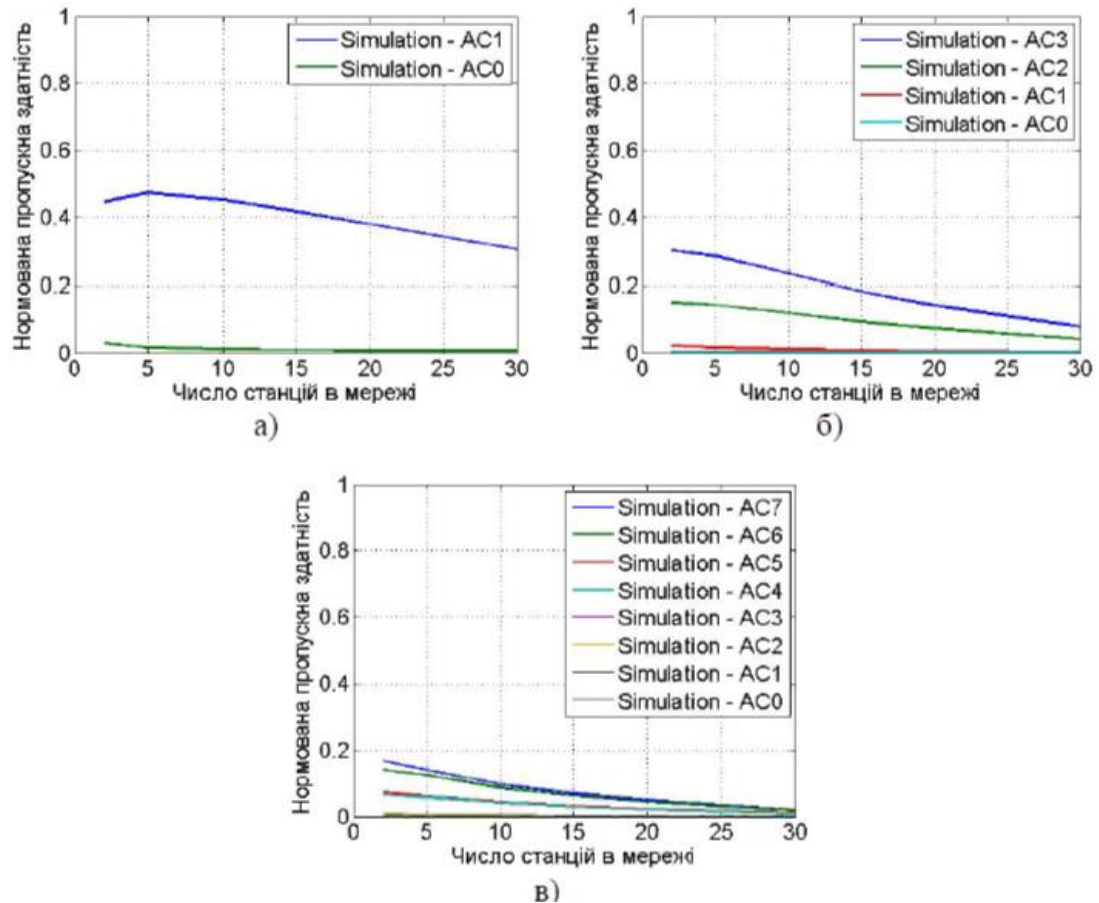


Рисунок 3.4 – Нормована пропускна здатність для схем поділу трафіку на а) дві, б) чотири та в) вісім категорій доступу

Отже, за умови насиченості, коли кожна станція завжди має в чергах кадри для передачі, схема доступу EDCA з поділом трафіку на категорії доступу в загальному є менш ефективна, ніж схема доступу DCF. Використання схеми поділу з двома категоріями доступу дозволяє зберегти досить високу загальну пропускну здатність мережі та досягнути достатньо високої якості обслуговування при високопріоритетному доступі.

Дослідження роботи безпроводової мережі в насиченому режимі дозволяє дослідити її поведінку та ефективність її роботи при критичних значеннях її завантаженості, а також оцінити граничні значення характеристик мережі. Оскільки насиченість реальної мережі не є частим та постійним явищем, дослідимо загальну пропускну здатність мережі зі змінною завантаженістю.

Дослідження пропускної здатності мережі зі змінною завантаженістю проводились для різного числа станцій в мережі: 5, що відповідає невеликій безпроводовій мережі, 10 – середня безпроводова мережа, та 30 – велика безпроводова мережа. Дослідження проводилось з метою оцінки впливу числа станцій в мережі на характеристики безпроводової мережі.

На рисунку 3.5 зображено зміну загальної нормованої пропускної здатності в залежності від завантаженості мережі, яка складається з 5, 10 та 30 станцій. І аналітична модель Енгельштада, і розроблена імітаційна модель дають подібні результати, але, як помітили самі автори моделі Енгельштада, для діапазону значень завантаженості 10-40% пропускна здатність, обчислена за аналітичною моделлю, переважає завантаженість мережі на ≈ 0.07 , що, швидше за все, на думку авторів, зумовлено грубістю прийнятого припущення при розробці моделі. Для врахування AIFS- диференціації між кадрами різних класів, автори ввели поняття додаткових слотів часу та припустили, що додаткові слоти часу рівномірно розподілені серед решти слотів часу. Тоді як в реальності додатковий слот з'являється одразу після іншого додаткового слоту або після успішної чи неуспішної передачі кадру. В результаті такого припущення, аналітична модель не цілком коректно описує поведінку мережі при її помірній завантаженості. В той же час розроблена імітаційна модель дозволяє оцінювати роботу безпроводової мережі на всьому діапазоні змін завантаженості.

Як видно з рисунка 3.5, безпроводова мережа майже у всіх випадках повністю справляється з завантаженістю до 40%, тобто для усіх чотирьох схем доступу загальна пропускна здатність безпроводової мережі близька до її завантаженості, лише для мережі з 30 станцій для схем з чотирма та вісьмома категоріями доступу безпроводова мережа перестає справлятися з всією завантаженістю, якщо вона є вищою за 30%. Для вищих значень завантаженості загальна нормована пропускна здатність не перевищує значення 0.51. Загальна пропускна здатність для схем доступу з двома, чотирма та вісьмома категоріями доступу зменшується зі зростанням завантаженості мережі, і чим більше станцій в мережі, тим стрімкіше вона зменшується. При бажаній завантаженості мережі у

100% використання схеми доступу без поділу трафіку за категоріями доступу дозволяє отримати загальну нормовану пропускну здатність вищу в 1.1 рази у порівнянні зі схемою з чотирма категоріями доступу для п'яти станцій, та в 1.2 і 1.8 рази для 10 та 30 станцій відповідно.

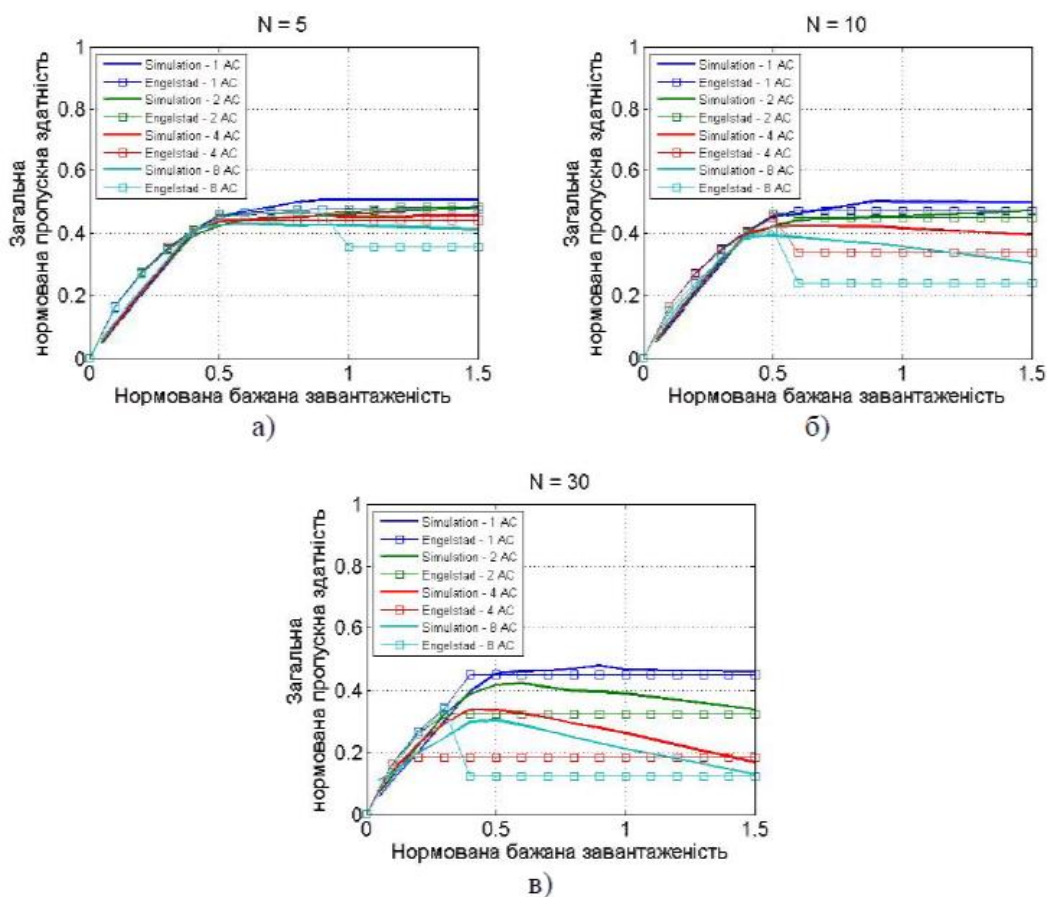


Рисунок 3.5 – Загальна нормована пропускну здатність для чотирьох схем доступу для безпроводової мережі, яка складається з а) 5, б) 10 та в) 30 станцій

Зобразивши пропускну здатність для кожного класу трафіку окремо, можна оцінити ефективність схем поділу трафіку на категорії доступу в залежності від завантаженості мережі. Так, на рисунку 3.6 зображено нормовану пропускну здатність для безпроводових мереж з 10 (рисунки 3.6а, б) та 30 станцій (рисунки 3.6в, г), які працюють згідно схеми доступу з поділом трафіку на дві, чотири та вісім категорій доступу.

Для схеми поділу на дві категорії доступу (рисунки 3.6а, б) для завантаженості мережі вище 40% у випадках 10 та 30 станцій мережа надає

перевагу в обслуговуванні кадрам вищого пріоритету. Чим вища завантаженість мережі, тим менше кадри нижчого пріоритету отримують доступ до середовища. Отже, навіть для високих значень завантаженості, мережа забезпечує пріоритетне обслуговування високопріоритетних кадрів.

Для схеми поділу на чотири категорії доступу (рисунки 3.6в, г) у випадку 10 станцій безпроводова мережа надає перевагу в доступі до середовища високопріоритетним кадрам категорій доступу АС2 та АС3 та забезпечує нормовану пропускну здатність для них на рівні 0.15-0.2. Відзначимо також досить високе значення нормованої пропускну здатності

≈ 0.1 для низькопріоритетних кадрів класу доступу АС1 при завантаженості мережі від 40-90%. Це, швидше за все, обумовлено зростанням ймовірності внутрішньої колізії між високопріоритетними кадрами та відтермінуванням їх передачі. У випадку 30 станцій безпроводова мережа все ще забезпечує пріоритетне право на передачу кадрів вищих категорій доступу, проте нормована пропускну здатність для них не перевищує значення ≈ 0.1 . При цьому нормована пропускну здатність трафіку категорії доступу АС1 для завантаженості мережі в межах 40-80% так само становить близько 0.1, що знову ж таки, швидше за все, зумовлено потраплянням кадрів вищих категорій доступу в колізії. Тобто, для високого числа станцій в мережі схема доступу з поділом на чотири категорії доступу на рівні обслуговує як високо пріоритетні кадри АС3 та АС2, так і низько пріоритетні кадри АС1.

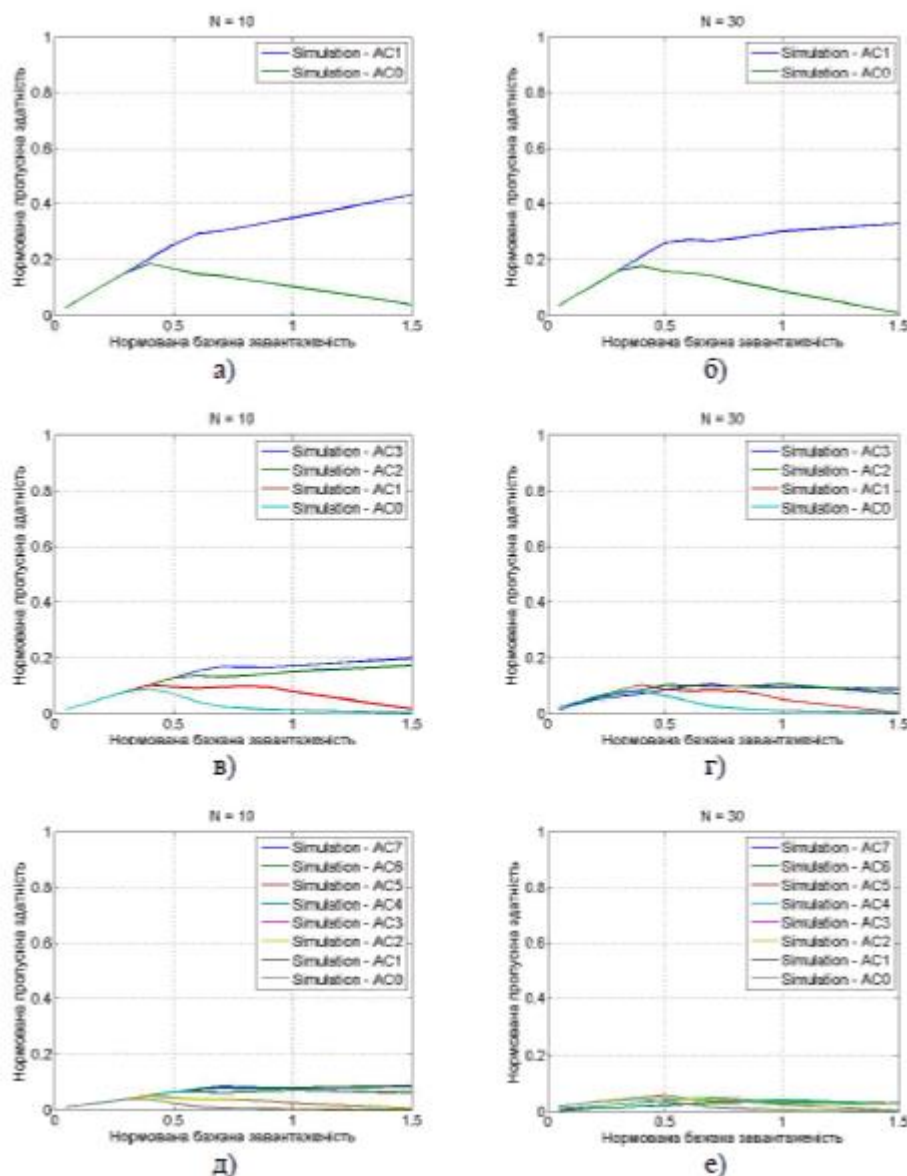


Рисунок 3.6 – Нормована пропускна здатність для схем поділу трафіку на а), б) дві в), г) чотири та д), е) вісім категорій доступу для 10 та 30 станцій відповідно

У випадку схеми з вісьмома категоріями доступу (рисунки 3.6д,е) нормована пропускна здатність для високопріоритетного трафіку не перевищує 0.1 для 10 станцій, а для 30 станцій – 0.06. При цьому у випадку 30 станцій (рисунок 3.6е) з ростом завантаженості мережі схема EDCA практично не забезпечує пріоритетний доступ для високопріоритетного трафіку.

Таким чином, можна відзначити, що схема доступу EDCA є чутливою як до завантаженості мережі, числа станцій в мережі, так і до числа категорій доступу – чим вищі показники цих характеристик, тим менш ефективною є робота

безпроводової мережі. Так, якщо для мережі з 10 станцій визначено дві категорії доступу, то пропускна здатність для високо пріоритетного трафіку забезпечується на рівні 0.3-0.35. Якщо збільшити число категорій доступу до чотирьох, то пропускна здатність для пріоритетного трафіку знизиться на $\approx 30\%$, а для схеми доступу з вісьмома категоріями доступу – на $\approx 60\%$.

3.2 Вплив співвідношення трафіків на продуктивність роботи безпроводової мережі

Вищенаведені дослідження проводились за умови, що в черги станції надходить однакова кількість кадрів кожної категорії доступу. Тобто співвідношення трафіків кожної категорії доступу становило 1:1 або 1:1:1:1 у випадку поділу трафіку на дві та чотири категорії доступу відповідно. В реальних мережах такий сценарій малоймовірний. Дослідимо зміну пропускної здатності безпроводової мережі для різного співвідношення високо- та низькопріоритетного трафіків. Для цього проведемо експерименти для таких сценаріїв співвідношення трафіків різних категорій доступу:

Сценарій А: в мережі переважає високопріоритетний трафік зі співвідношенням до низькопріоритетного трафіку як $AC1:AC0 = 3:1$ у випадку поділу трафіку на дві категорії доступу, або $AC3:AC2:AC1:AC0 = 3:3:1:1$ у випадку поділу трафіку на чотири категорії доступу. Тобто, безпроводова мережа здебільшого зайнята передачею голосового та відео трафіку.

Сценарій В: в мережі переважає низькопріоритетний трафік зі співвідношенням до високопріоритетного трафіку як $AC1:AC0 = 1:3$ у випадку поділу трафіку на дві категорії доступу, або $AC3:AC2:AC1:AC0 = 1:1:3:3$ у випадку поділу трафіку на чотири категорії доступу. Тобто, безпроводова мережа здебільшого зайнята передачею фонового трафіку або трафіку найкращих зусиль.

На рисунку 3.7 зображено нормовану пропускну здатність для схеми поділу трафіку на дві категорії доступу при його співвідношенні згідно сценаріїв А та В.

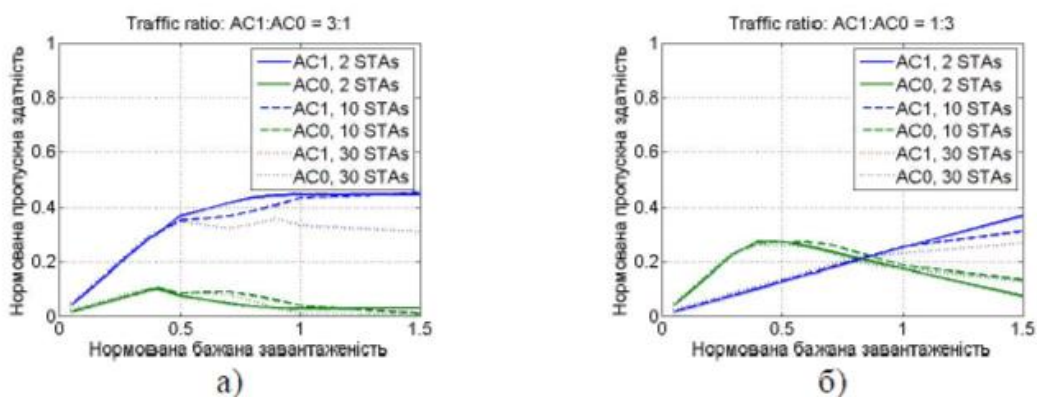


Рисунок 3.7 – Нормована пропускна здатність для схеми поділу трафіку на дві категорії доступу при співвідношенні трафіків згідно а) сценарію А та б) сценарію В для 2, 10 та 30 станцій в мережі

Згідно сценарію А (рисунок 3.7а), в мережі переважає високопріоритетний трафік, та схема доступу EDCA добре забезпечує його пріоритетний доступ, пригнічуючи передачу низькопріоритетних кадрів, що добре видно при завантаженості мережі > 0.4 . Максимальна пропускна здатність для безпроводових мереж невеликих (2 станції) та середніх розмірів (10 станцій) становить близько 0.45. Для великих мереж (30 станцій) пропускна здатність для високопріоритетних кадрів не перевищує значення 0.35 у зв'язку з вищою ймовірністю виникнення колізії в мережі в наслідок одночасної передачі кадрів кількома станціями. Так само добре забезпечується пріоритетний доступ високопріоритетних кадрів, якщо в мережі переважає низькопріоритетний трафік (сценарій В (рисунок 3.7б)). Так, для невеликих мереж високопріоритетний трафік практично весь передається в усьому діапазоні завантаженостей мережі. Для мереж середнього та великого розміру високопріоритетний трафік перестає повністю передаватись при завантаженості мережі більше 1 та 0.8 відповідно, що пов'язано зі збільшенням ймовірності одночасного доступу до середовища кількох станцій. При цьому величина переданого низькопріоритетного трафіку при завантаженості мережі > 0.4 практично лінійно спадає для мереж усіх розмірів.

Проаналізуємо нормовану загальну пропускну здатність для різного співвідношення високо- та низькопріоритетного трафіків (рисунок 3.8).

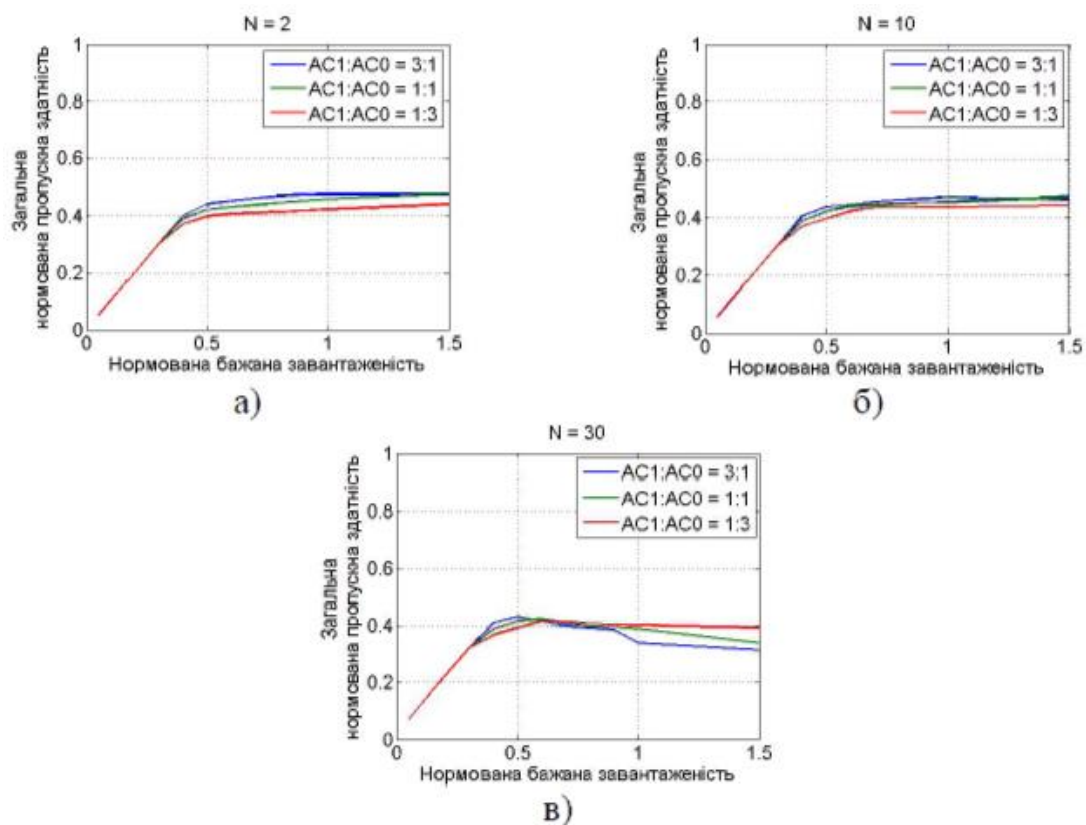


Рисунок 3.8 – Загальна нормована пропускну здатність для схеми поділу трафіку на дві категорії доступу при різному співвідношенні трафіків для а) 2, б) 10 та в) 30 станцій в мережі відповідно

Для безпроводової мережі середніх розмірів (рисунок 3.8б) зміна співвідношення високо- та низькопріоритетного трафіків практично не впливає на загальну пропускну здатність. Для безпроводової мережі, яка містить дві станції (рисунок 3.8а), загальна пропускну здатність, у випадку переважання низькопріоритетного трафіку, нижча в середньому на 0.03- 0.05, ніж при інших співвідношеннях трафіку. Якщо ж число станцій в мережі збільшити до 30 (рисунок 3.8в), то при високій завантаженості загальна пропускну здатність при співвідношенні AC1:AC0 як 1:3 вища на 0.05-0.07, ніж при співвідношенні AC1:AC0 як 1:1 чи 3:1.

Нормована пропускна здатність для схеми поділу трафіку на чотири категорії доступу при його співвідношенні згідно сценаріїв А та В зображена на рисунку 3.9.

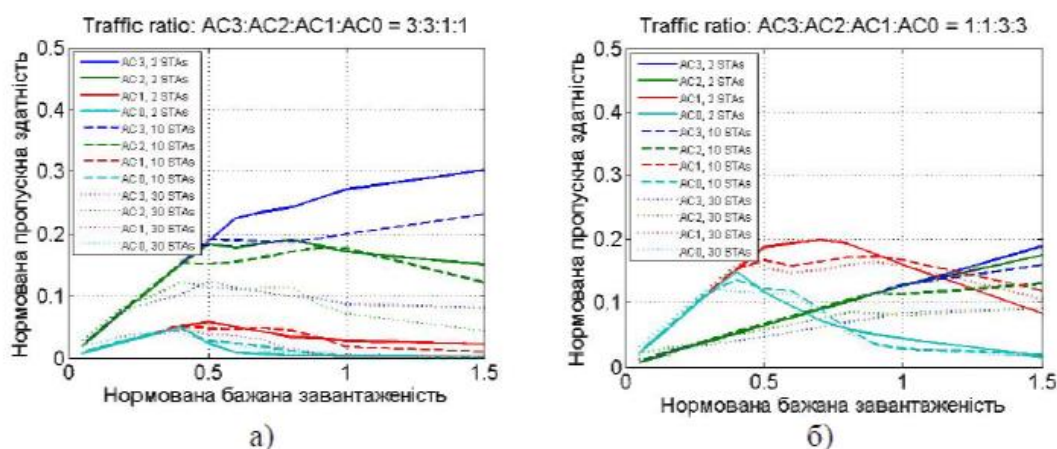


Рисунок 3.9 – Нормована пропускна здатність для схеми поділу трафіку на чотири категорії доступу при співвідношенні трафіків згідно а) сценарію А та б) сценарію В для 2, 10 та 30 станцій в мережі

Для сценарію А (рисунок 3.9а) як і у випадку поділу трафіку на дві категорії доступу, високопріоритетному трафіку забезпечено першочерговий доступ до середовища. Ріст числа станцій в мережі суттєво знижує пропускну здатність для високопріоритетного трафіку. Так, при завантаженості мережі 80% її пропускна здатність для високопріоритетного трафіку нижча приблизно в 1.2 та 2.4 рази відповідно для мережі з 10 та 30 станцій порівняно з мережею з двох станцій. В той же час при двох категоріях доступу (рисунок 3.7а) пропускна здатність мережі для високопріоритетного трафіку знижується в найгіршому випадку у 1.5 рази при зростанні числа станцій в мережі з 2 до 30. При цьому відзначимо, що чим більше станцій в мережі, тим менша різниця між пропускну здатністю для трафіку AC3 та AC2, що пов'язано, швидше за все, зі зростанням ймовірності виникнення колізії при одночасному доступу до середовища кількома станціями.

Для сценарію В (рисунок 3.9б) в мережі переважає низькопріоритетний трафік. При завантаженості мережі < 40% весь згенерований трафік як низькопріоритетний, так і високопріоритетний, передається в мережі повністю.

При завантаженості більше 40% об'єм переданого низькопріоритетного трафіку знижується порівняно зі згенерованим. При цьому схема доступу EDCA надає перевагу на передачу кадрам категорії доступу AC1, оскільки їх пріоритет вищий. Для сценарію В частка високопріоритетного трафіку є низькою (лише 1/4), відповідно схема доступу EDCA практично повністю дозволяє його передати для мереж малого та середнього розміру. Для великих мереж при завантаженості 100% передається близько 70% вхідного високопріоритетного трафіку, в той час як низькопріоритетного трафіку AC1 – 43%, а найнижчого AC0 – всього 7%. Для обох сценаріїв характер зміни залежності нормованої пропускної здатності від бажаної завантаженості мережі для низькопріоритетного трафіку практично не залежить від числа станцій в мережі.

Проаналізуємо загальну пропуску здатність для різного співвідношення високо- та низькопріоритетного трафіків та різного числа станцій (рисунок 3.10). Для мережі, яка складається з двох (рисунок 3.10а) або 10 (рисунок 3.10б) станцій, зміна співвідношення трафіків майже не впливає на загальну пропуску здатність мережі.

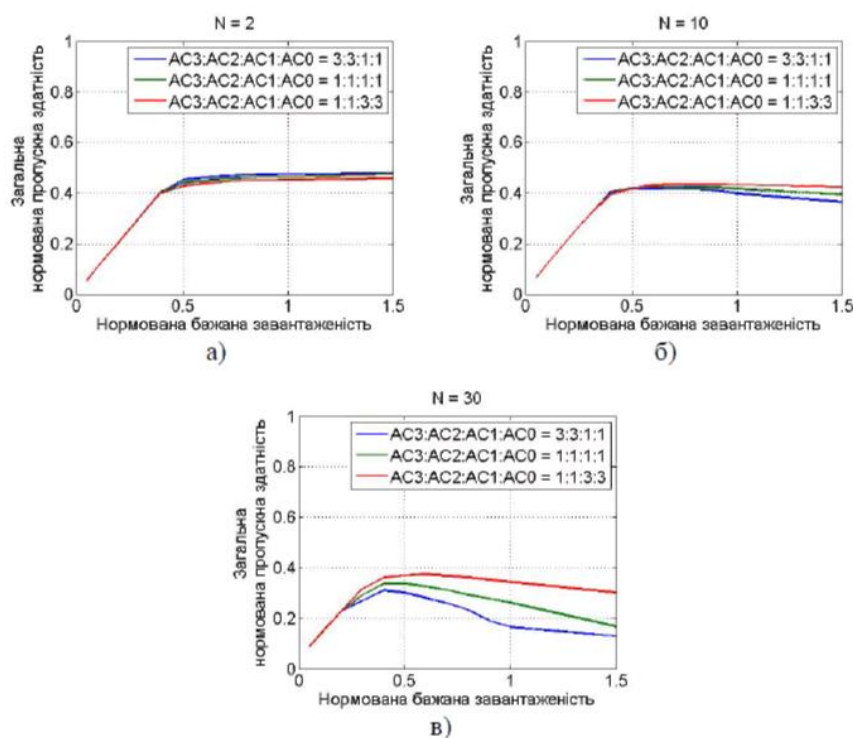


Рисунок 3.10 – Загальна нормована пропускна здатність для схеми поділу трафіку на чотири категорії доступу при різному співвідношенні трафіків для а) 2, б) 10 та в) 30 станцій в мережі відповідно

У випадку 30 станцій (рисунок 3.10в) найвища загальна пропускна здатність досягається у випадку переважання в мережі низькопріоритетного трафіку, найнижча – у випадку переважання в мережі високопріоритетного трафіку. При цьому найбільша різниця між значеннями (практично в 2 рази) спостерігається для високих значень завантаженості мережі. Значення MAC- параметрів для високопріоритетних категорій доступу налаштовані таким чином, аби вони швидше могли отримувати доступ до середовища та менше очікували на повторну передачу при попаданні в колізію. При великому числі станцій зростає ймовірність одночасного доступу до середовища двома або більше станціями та, відповідно, виникнення колізії. Оскільки значення максимального вікна конкуренції CW_{max} для високопріоритетних кадрів на два порядки нижче, ніж для низькопріоритетних кадрів, то ймовірність згенерувати однаковий проміжок відтермінування вища для високопріоритетних кадрів. Це в свою чергу веде до попадання кадрів в наступну колізію та відкидання кадру для передачі при досягненні максимального числа повторних передач. Як видно з рисунка 3.9а, для мережі з 30 станцій нормована пропускна здатність для кадрів категорії доступу AC3 та AC2 не перевищує 0.13. Разом з тим для кадрів категорії доступу AC1 та AC0 (рисунок 3.9б) максимальна пропускна здатність становить 0.16 та 0.12 відповідно.

Підсумовуючи, можна відмітити, що зміна співвідношення високо- та низько пріоритетного трафіку не має суттєвого впливу на зміну пропускної спроможності для безпроводових мереж малого та середнього розміру. Для великих безпроводових мереж зростання частки високопріоритетного трафіку знижує загальну пропускну здатність мережі на 30-35%. Відзначимо також, що чим більше категорій доступу для великих безпроводових мереж, тим нижча загальна пропускна здатність (рисунок 3.8в та рисунок 3.10в).

3.3 Дослідження забезпечення безпроводовою мережею якості передачі високопріоритетного трафіку

Кожен тип трафіку характеризується власними вимогами до пропускної здатності, швидкості передачі, затримки передачі та її варіації, ймовірності бітової помилки тощо. Так, при передачі голосового трафіку через безпроводову мережу достатньо забезпечити досить невисоку швидкість передачі, яка, в залежності від методу стискання голосу, становить близько 20 Кбіт/с [102]; також голосовий трафік є терпимим до високої ймовірності бітової помилки ($BER \approx 10^{-3}$), але при цьому затримка передачі кадру повинна бути менша, ніж 30 мс [102], інакше вона стає помітною для користувача. Для відео трафіку в реальному часі крім аналогічних вимог до затримки передачі важливо забезпечити ще й високу швидкість передачі. Так, наприклад, більшість типів потокового відео стандартної чіткості (Standard-definition, SD) потребують 1-3 Мбіт/с пропускної здатності, для потокового відео високої чіткості (High-definition, HD) – 4-6 Мбіт/с [103]. Для передачі даних потрібна висока швидкість передачі (1-100 Мбіт/с) та низька ймовірність бітової помилки (бажана величина $BER < 10^{-8}$ та всі помилкові біти мають бути повторно передані), з іншого боку трафік даних немає визначених обмежень щодо величини затримки передачі. Ще один тип трафіку – фоновий трафік – не є вимогливим ні до швидкості передачі, ні до затримок.

Зважаючи на те, що в безпроводових мережах часто виникають ситуації з високою завантаженістю, дослідимо за якої умови в мережі можна гарантувати якісну передачу високопріоритетного трафіку в присутності низькопріоритетного трафіку. Для цього проаналізуємо вихідні трафіки станції та точки доступу безпроводової мережі та затримку при передачі кадру для схем поділу трафіку на дві та чотири категорії доступу щодо забезпечення вимог високопріоритетного трафіку до якості передачі: пропускна здатність має становити щонайменше 20 Кбіт/с та 1 Мбіт/с для голосового та потокового SD-відео трафіку відповідно, а затримка при передачі кадру не має перевищувати 30 мс. Нагадаємо, що безпроводова мережа функціонує в режимі Infrastructure Mode, де кожна із

станцій намагається передати свій згенерований трафік через точку доступу. При цьому точка доступу обслуговує 10 або 30 станцій, що відповідає середньому та великому розмірам безпроводової мережі відповідно. В нашому експерименті також припущено, що усі станції матимуть на вході високо- та низькопріоритетний трафіки. Нормована інтенсивність вхідного трафіку станції змінюється в межах 0.01-0.25, оскільки для вищих значень інтенсивності вхідного трафіку станції завантаженість мережі стає насиченою.

Оскільки пріоритетна передача високопріоритетного трафіку забезпечується при будь-якому його співвідношенні з низькопріоритетним, розглянемо випадок співвідношення трафіків як 1:1 або 1:1:1:1 відповідно для схеми поділу трафіку на дві або чотири категорії доступу. Аналіз було проведено для безпроводових мереж середнього та великого розміру, оскільки на продуктивність таких мереж суттєвий вплив має ймовірність одночасного доступу кількома станціями. Значення необхідної пропускну здатності для голосового та відео трафіку пронормовані по швидкості передачі 54 Мбіт/с та становлять відповідно 3.7×10^{-4} і 1.85×10^{-2} .

На рисунку 3.11 зображено нормовану пропускну здатність та середній час доставки кадру для високопріоритетного трафіку однієї з 10 станцій та точки доступу у випадку схеми поділу трафіку на дві категорії доступу. Перш за все відзначимо, що для мережі з 10 станцій вже при завантаженості станції > 0.05 її вихідний трафік та вихідний трафік точки доступу стають насиченими та не перевищують значення 0.043 та 0.025 відповідно. Для мережі з 30 станцій трафік станції та точки доступу стає насиченим при завантаженості станції > 0.015 та не перевищує 0.01 та 0.003 відповідно.

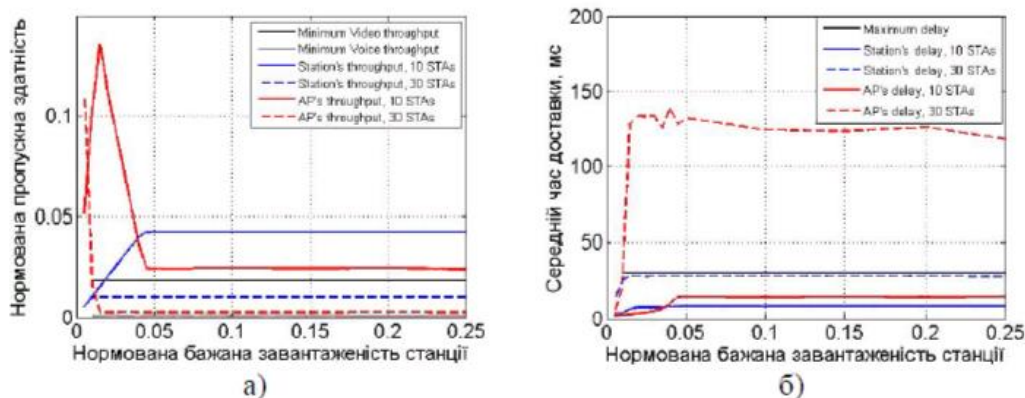


Рисунок 3.11 – Нормована пропускна здатність та середній час доставки кадру для високопріоритетного трафіку танції та точки доступу для схеми поділу трафіку на дві категорії доступу

У випадку мережі з 10 станцій вихідний трафік станції (рисунок 3.11а) суттєво вищий, ніж необхідна пропускна здатність для якісної передачі голосу та потокового SD-відео. Для точки доступу вихідний трафік не перевищує значення 0.136 при завантаженості < 0.1 та становить приблизно 0.025 при завантаженості станції > 0.1 , що є вище, ніж необхідна пропускна здатність. Проте, зважаючи на те, що точці доступу в даному експерименті необхідно передати голосовий та відео трафік від усіх 10 станцій в мережі, вихідний трафік точки доступу має бути на рівні 03.7-3 і 0.185 аби забезпечити необхідну якість голосового та потокового SD-відео відповідно. Отже, вихідного трафіку точки доступу достатньо, аби забезпечити якісну передачу голосового трафіку для усіх станцій мережі одночасно, та недостатньо для якісного обслуговування відео трафіку. Для станції пропускна здатність для високопріоритетного трафіку суттєво вища, ніж необхідна пропускна здатність (з урахуванням прийнятих параметрів MAC та фізичного рівнів безпроводової мережі) для якісної передачі голосу та потокового SD-відео. Середній час доставки високопріоритетного кадру (рисунок 3.11б) і для станції, і для точки доступу не перевищує 15 мс, що для даного експерименту вдвічі ніж достатньо для якісної передачі голосового та відео трафіку.

Якщо розмір мережі збільшити до 30 станцій, то пропускна здатність, яка забезпечується станцією, є достатньою для передачі голосового трафіку, проте

недостатньою для передачі потокового SD-відео. Точці доступу необхідно забезпечити вихідний трафік на рівні 0.0111 та 0.555 для якісної передачі голосового та відео трафіку відповідно. З рисунка 3.11а видно, що вихідного трафіку точки доступу недостатньо для передачі потокового відео трафіку (в найкращому випадку вихідний трафік становить 0.11), а якісна передача голосового трафіку усіх 30 станцій можлива лише при завантаженості < 0.015 , коли вихідний трафік є вищим за 0.016. Середній час доставки високопріоритетного кадру станцією не перевищує 29 мс, що задовольняє вимоги до затримки кадру. Для точки доступу значення середнього часу доставки кадру лежить в межах 120-140 мс при завантаженості > 0.015 , тобто затримка передачі кадру є помітною для користувача. Отже, для безпроводової мережі, яка працює у режимі Infrastructure Mode, її розмір має критичне значення в контексті забезпечення якості передачі голосового та відео трафіків, оскільки з ростом кількості станцій точка доступу зазнає значно більшої завантаженості, ніж станції.

На рисунку 3.12 зображені характеристики мережі для високопріоритетного трафіку у випадку схеми поділу трафіку на чотири категорії доступу.

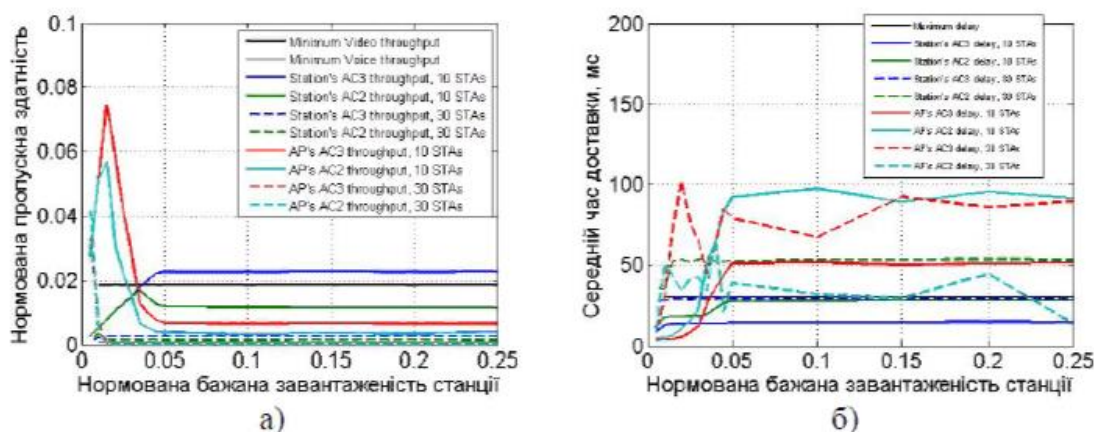


Рисунок 3.12 – Нормована пропускна здатність та середній час доставки кадру для високопріоритетного трафіку станції та точки доступу для схеми поділу трафіку на чотири категорії доступу

Для безпроводових мереж середнього розміру необхідна пропускна здатність забезпечується для станції лише для голосового трафіку (AC3) (рисунок

3.12а), для відео трафіку (AC2) пропускна здатність не перевищує 0.012 при завантаженості станції > 0.05 , що в 1.5 рази нижче, ніж необхідна пропускна здатність для потокового SD-відео трафіку. При завантаженості станції < 0.05 в найкращому випадку її вихідний трафік сягає величини 0.017, чого все рівно недостатньо для якісної передачі потокового відео. Для точки доступу, з урахуванням того, що їй необхідно передати трафік усіх станцій мережі, необхідно забезпечити пропускну здатність для голосового трафіку (AC3) щонайменше 3.7×10^{-3} та для відео трафіку (AC2) – 0.185, тоді як, згідно результатів експерименту, вихідний трафік точки доступу становить 0.007 та 0.004 відповідно (рисунок 3.12а) при завантаженості станції > 0.05 . При нижчій завантаженості станції вихідний трафік точки доступу цілком задовольняє вимоги до передачі голосового трафіку. Тобто за даних умов експерименту, точка доступу може забезпечити лише необхідну якість передачі голосового трафіку усіх станцій. Аналогічно для середнього часу доставки кадру – значення середньої затримки кадру голосового трафіку при передачі станцією або точкою доступу є нижчим, ніж 30 мс; для кадру відео трафіку середній час доставки станцією становить ≈ 50 мс, а для точки доступу – 70-90 мс, і лише при завантаженості ≤ 0.05 середній час доставки для станції та точки доступу є нижчим, ніж 30 мс. Тобто, безпроводова мережа середнього розміру, яка забезпечує доступ до середовища згідно схеми EDCA з поділом трафіку на чотири категорії доступу, може забезпечувати необхідну якість передачі лише для голосового трафіку.

При зростанні числа станцій в безпроводовій мережі ні голосовий, ні потоковий SD-відео трафік не передаються з необхідною якістю. При цьому, якщо станції-відправнику вдається забезпечити прийнятну пропускну здатність (рисунок 3.13) та затримку (рисунок 3.12б) при передачі голосового трафіку (AC3), то точці доступу через значну її завантаженість ні. Таким чином, для великих безпроводових мереж за умови, що кожна станція в мережі передає трафік різного пріоритету у рівних пропорціях, не вдається забезпечити якість передачі високопріоритетного трафіку, якщо доступ до середовища відбувається згідно схеми EDCA з поділом трафіку на чотири категорії доступу.

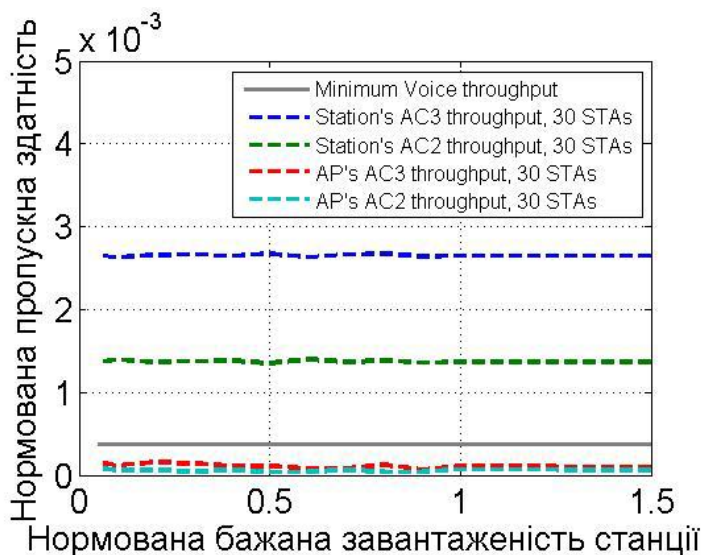


Рисунок 3.13 – Нормована пропускна здатність високопріоритетного трафіку станції та точки доступу безпроводової мережі великого розміру для схеми поділу трафіку на чотири категорії доступу

Підсумовуючи, відзначимо, що для безпроводової мережі, яка працює в режимі Infrastructure Mode, гарантування якості передачі високопріоритетного трафіку залежить від розміру мережі, оскільки чим більше станцій в мережі, тим вища завантаженість точки доступу, яка є ключовим елементом при передачі кадру між станціями. Зменшення числа категорій доступу в схемі поділу трафіку з чотирьох до двох, дозволяє покращити якість передачі високопріоритетного трафіку. Так, для проведеного експерименту на прикладі потового SD-відео видно, що для безпроводових мереж середнього розміру при використанні схеми поділу трафіку на дві категорії доступу можна забезпечити достатню для якісної передачі пропускну здатність та затримку при передачі кадру – 1.3 Мбіт/с та 14.3 мс відповідно, тоді як для схеми доступу на чотири категорії доступу пропускна здатність та затримка при передачі кадру точки доступу дозволяє якісно передавати лише голосовий трафік, оскільки пропускна здатність голосового трафіку становить 177 Кбіт/с, а затримка – 30-35 мс. Зазначимо, що вищенаведені висновки справедливі для швидкості передачі в безпроводовій мережі 54 Мбіт/с, оскільки зниження або зростання швидкості передачі на фізичному рівні

приведе, відповідно, до погіршення або покращення таких характеристик як пропускна здатність та часова затримка передачі.

Результати проведеного дослідження показали доцільність та необхідність введення механізму управління під рівнем MAC для безпроводових мереж з метою підвищення ефективності роботи безпроводової мережі та забезпечення якості передачі високопріоритетного трафіку.

4 ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ДОСТУПУ ДО ФІЗИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА З ПРІОРИТЕТНИМ ОБСЛУГОВУВАННЯМ

4.1 Вибір та обґрунтування чинників механізму прийняття рішень адаптивного алгоритму регулювання числа категорій доступу схеми EDCA

Опираючись на результати дослідження ефективності роботи безпроводової мережі для схем доступу з різним числом категорій доступу, постає задача розробити алгоритм адаптивного вибору числа категорій доступу для схеми EDCA, який передбачає адаптивну зміну числа категорій доступу в залежності від ряду параметрів MAC-підрівня станції, які можна оцінити протягом певного інтервалу накопичення. До параметрів, які можна використати для оцінки стану мережі та станції зокрема, можна віднести: наявність в чергах станції кадрів вищих категорій доступу, середній час доставки, інтенсивність потрапляння кадрів у колізії, зміна середнього розміру вікна конкуренції.

Для формулювання кроків алгоритму адаптивного вибору числа категорій доступу для схеми EDCA та визначення його ключових параметрів необхідно провести дослідження впливу зростання трафіку станції на її експлуатаційні характеристики. Оскільки завантаженість мережі носить змінний характер, в дослідженні припустимо, що вхідний трафік станції різко зростає та падає – тобто його зростання є пульсуючим та короткотривалим.

Потік даних, такий як інтернет-трафік чи електронна пошта, є за своєю природою нерівномірним, тобто для нього характерна флуктуація інтенсивності в широких діапазонах, періоди пікової завантаженості змінюються спокійними періодами. В той же час потоковий трафік, такий як голосовий, має відносно низьку зміну інтенсивності та зазвичай має перерви. Відповідно при виборі чинників механізму прийняття рішень адаптивного алгоритму дослідження проводитиметься з урахуванням того, що трафік в безпроводовій мережі носить пульсуючий характер.

Припустимо, що мережа складається з точки доступу та N станцій. Сценарій досліджень передбачає, що при відсутності пульсуючого навантаження сукупний трафік мережі в експерименті не перевищуватиме 20 % її пропускної здатності. Враховуючи, що половина трафіку мережі генерується точкою доступу при ретрансляції кадрів, середня завантаженість, що буде внесена кожною станцією становитиме $(10/N)$ %. Нехай, в якийсь момент часу роботи мережі, що працює за таким сценарієм, завантаженість однієї зі станцій зростає так, що загальна завантаженість мережі в свою чергу зростає до 80%, а потім через певний проміжок часу завантаженість станції спадає назад до $(10/N)$ %.

Розглянемо найпростіший випадок, коли мережа складається з двох станцій. Імпульсне навантаження мережі спричиняє станція ST1, для якої вихідний трафік усіх типів категорій доступу зростає так, що загальна завантаженість мережі становить 80%. На рисунках 4.1, 4.2 та 4.5 зображено пропускну здатність, середній час доставки та інтенсивність колізій відповідно. Як бачимо з рисунку 4.1, інтервал розвантаження мережі приблизно в 6-7 разів довший за інтервал навантаження пульсації.

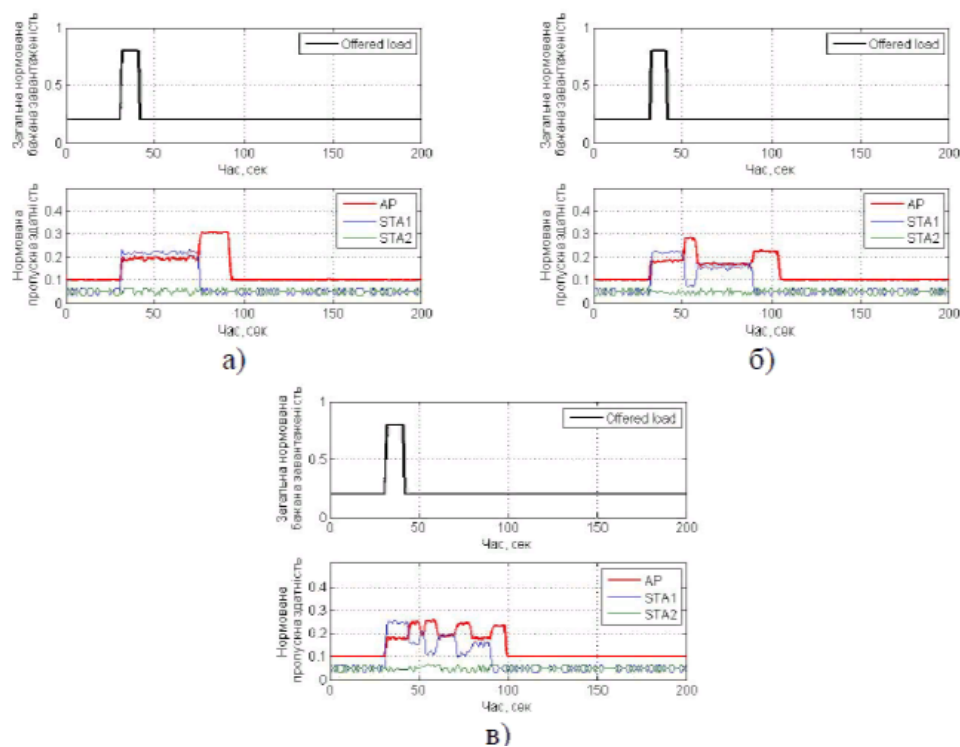


Рисунок 4.1 – Загальна нормована пропускну здатність мережі з двох станцій при схемі поділу трафіку на а) одну, б) дві та в) чотири категорії доступу

Відзначимо, що для усіх схем поділу трафіку (рисунки 4.1а, б та в) спостерігається пульсуюче зростання та падіння нормованої загальної пропускної здатності мережі.

Аналізуючи випадок схеми без поділу трафіку спостерігається зростання пропускної здатності точки доступу. Таке зростання можна пояснити тим, що розмір буферу черг станції та точки доступу прийнято як необмежений, таким чином, в буфері точки доступу накопичуються всі кадри, які вона не встигає передати під час прийому інтенсивного трафіку з боку однієї з станцій. Після завершення передачі інтенсивного трафіку станцією ST1 її завантаженість знижується до рівня 5% ($10/N$) загальної завантаженості мережі. А отже, точка доступу отримує можливість передати накопичені в черзі кадри, що й спричиняє ріст її завантаженості. Аналогічно, для схем поділу трафіку на дві та чотири категорії доступу після піку зростання завантаженості мають місце відповідно два та чотири наступні пульсуючі збільшення завантаженості, причиною яких є отримання переваги на передачу відповідно до пріоритету накопичених кадрів в чергах точки доступу та станції.

Середній час доставки кадру між станцією і точкою доступу (рисунок 4.2) та інтенсивність колізій в мережі (рисунок 4.5) також стрибкоподібно реагують на різке зростання вхідного трафіку станції ST1. Так, середній час доставки кадру зростає в 1.5-2 рази у випадку схеми доступу без категорій доступу та в 4-6 разів і в 4-15 разів у випадку схем доступу з двома та чотирма категоріями доступу відповідно.

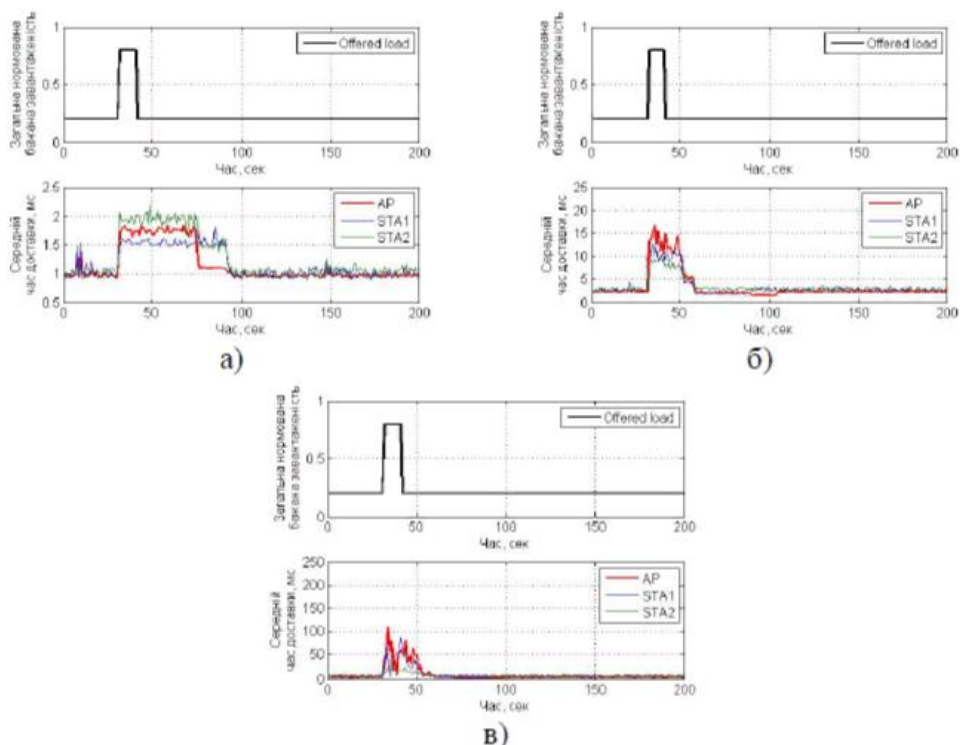


Рисунок 4.2 – Середній час доставки кадру для мережі з двох станцій при схемі поділу трафіку на а) одну, б) дві та в) чотири категорії доступу

Відзначимо, що для схеми поділу на чотири категорії доступу середній час доставки кадру вищий, ніж допустима затримка передачі кадру – 30 мс [102], при якій забезпечується необхідна якість обслуговування високопріоритетного трафіку. Проте, розглянувши зміну середнього часу доставки для кадрів різної категорії доступу (рисунок 4.3), бачимо, що суттєвий вклад в зростання середнього часу доставки кадру вносить затримка передачі низькопріоритетних кадрів.

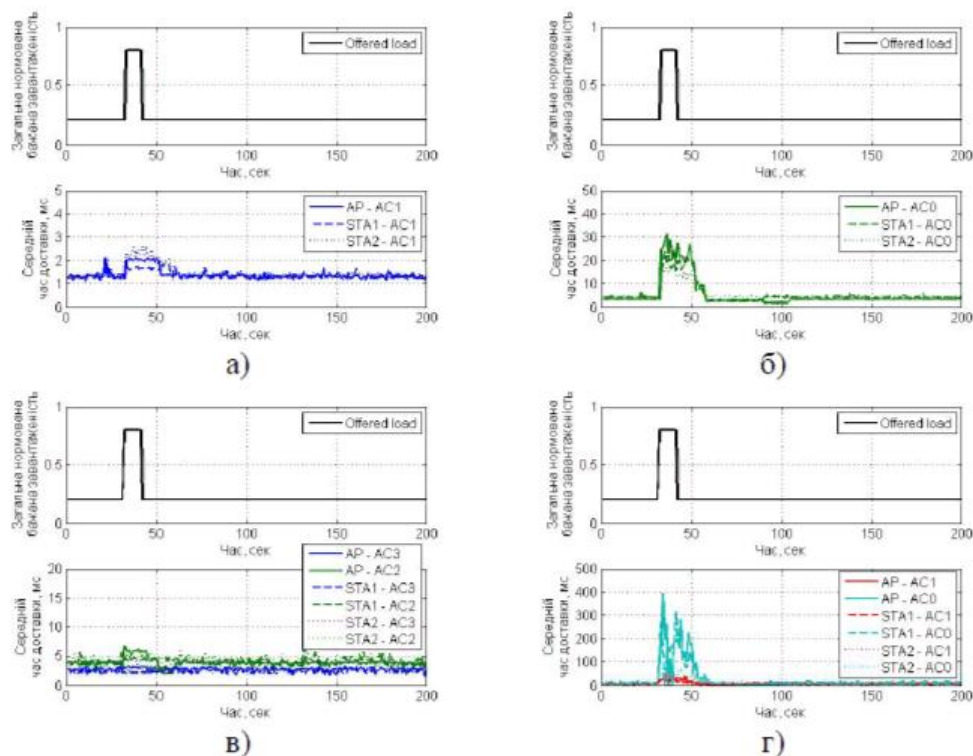


Рисунок 4.3 – Середній час доставки для а), в) високопріоритетних та б), г) низькопріоритетних кадрів для мережі з двох станцій та при схемі поділу рафіку на а), б) дві та в), г) чотири категорії доступу відповідно

І для схеми доступу з двома категоріями доступу (рисунок 4.3а), і для схеми доступу з чотирма категоріями доступу (рисунок 4.3в) середній час доставки високопріоритетного кадру нижчий за допустиму затримку в 30 мс. При цьому для схеми доступу з двома категоріями доступу середній час оставки високопріоритетного кадру в середньому в 2-2.5 рази нижчий, ніж для схеми доступу з чотирма категоріями доступу.

Для середнього часу доставки кадру інтенсивність колізій в мережі (рисунок 4.4) також стрибкоподібно реагує на різке зростання вхідного трафіку однієї зі станцій. Інтенсивність колізій зростає на початку інтервалу пульсації завантаженості мережі та поступово спадає після його закінчення. Чим більше категорій доступу в мережі, тим вища інтенсивність колізій.

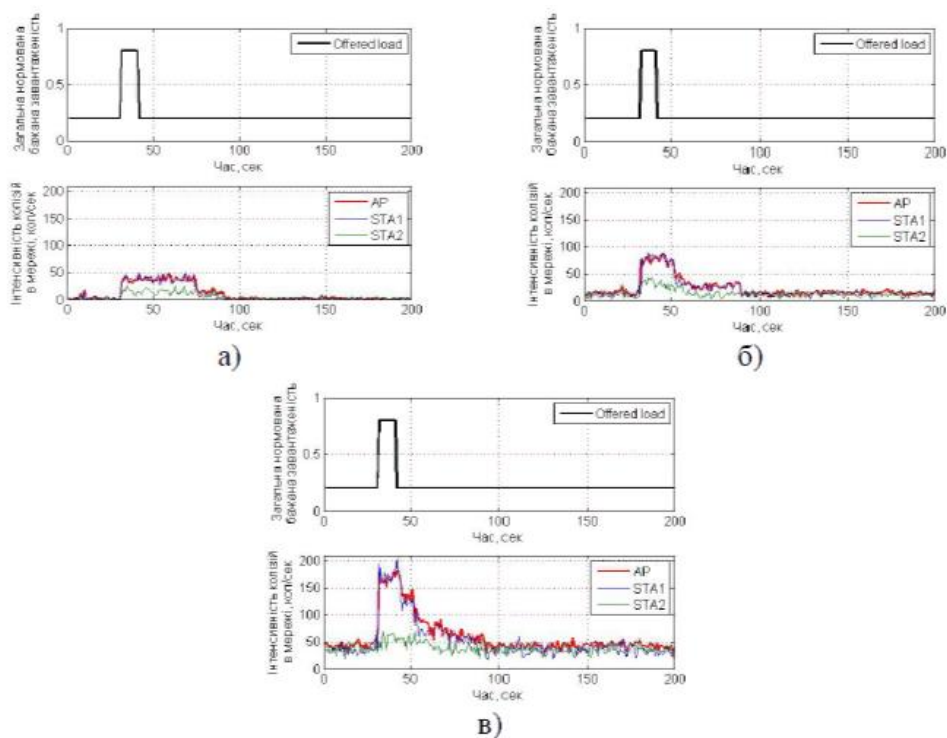


Рисунок 4.4 – Інтенсивність колізій в мережі з двох станцій та при схемі поділу трафіку на а) одну, б) дві та в) чотири категорії доступу відповідно

Обидва параметри – середній час доставки та інтенсивність колізій, дають можливість відслідкувати різке зростання завантаженості мережі для усіх схем поділу трафіку в мережі та, відповідно, можуть слугувати індикатором для прийняття рішень при адаптивній схемі управління доступом на MAC-підрівні. Варто відзначити, що станція, для якої авантаженість не змінювалась, також може “відчути” зростання/зниження завантаженості мережі, аналізуючи зміну середнього часу доставки кадру.

Проаналізуємо тепер характеристики MAC-підрівня мережі з більшим числом станцій, яка працює згідно того ж самого сценарію: завантаженість мережі становить 20%; через певний проміжок часу завантаженість однієї зі станцій зростає так, що загальна завантаженість мережі становить 80%, та потім спадає назад до $10/N$ %, де N – число станцій в мережі. Оскільки для схеми адаптивного вибору числа категорій доступу є важливим перехід від більшого числа категорій доступу до меншого та навпаки, дослідимо крайні випадки, коли в мережі одна та чотири категорії доступу.

На рисунку 4.5 зображено зміну середнього часу доставки для мережі, яка складається з 5 та 10 станцій.

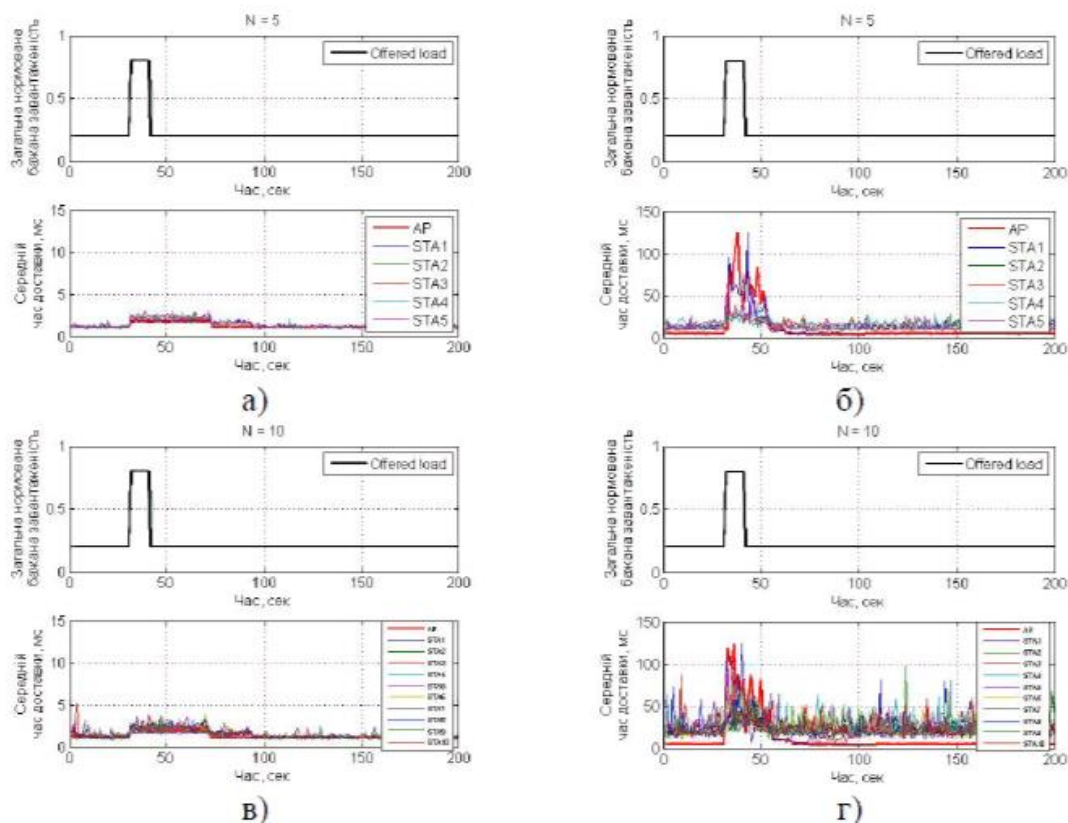


Рисунок 4.5 – Середній час доставки кадру для мережі з 5 та 10 станцій та при схемі поділу трафіку на а), в) одну та б), г) чотири категорії доступу відповідно

Як і у випадку двох станцій при схемі доступу з однією категорією доступу (рисунки 4.5а, в) кожна станція в мережі та точка доступу може виокремити сплеск та падіння завантаженості мережі, оскільки середній час доставки змінюється приблизно у 2-2.5 рази.

У випадку схеми доступу з чотирма категоріями доступу (рисунки 4.5б, г) зміну завантаженості в мережі “відчувають” станція ST1, яка спричинила зміну завантаженості, та точка доступу. Середній час доставки кадру для них змінюється в середньому у 8-12 разів. Решті станцій з ростом їх числа в мережі все складніше “відчутти” зміну завантаженості – зміна середнього часу доставки

кадру становить приблизно 2-2.5 рази. При цьому чим більше станцій в мережі, тим більший розкид значень середнього часу доставки кадру.

Аналізуючи таку характеристику як інтенсивність колізій (рисунок 4.6), відзначимо, що її різке зростання (приблизно у 4-5 разів), як відгук на різку зміну завантаженості мережі, спостерігається для точки доступу та станції ST1, яка спричинила ріст завантаженості мережі. Для решти станцій мережі зміна їх інтенсивностей колізій не дає змоги однозначно визначити момент зміни завантаженості в мережі.

Як підсумок, відзначимо, що така характеристика станції як середній час доставки кадру, дає змогу визначити різку зміну завантаженості мережі усім її учасникам, не залежно від розміру мережі та числа категорій доступу в схемі EDCA.

Зміну середнього часу доставки, яка б вказувала на різку зміну завантаженості мережі, можна визначити, аналізуючи попередні значення цього параметру. Застосуємо метод рухомого середнього з довжиною вікна 5, 10 та 15 значень. Довжини вікна методу рухомого середнього вибрано невеликі, оскільки, чим довше вікно використовується в методі рухомого середнього, тим більш згладженими будуть результати обробки, а, відповідно, тим складніше зафіксувати момент різкої зміни значення середнього часу доставки кадру. Зафіксуємо перше отримане середнє як базове, усі наступні отримані значення порівнюватимемо з базовим. Перевищення обчисленого значення над базовим на певну величину може слугувати для станції ознакою того, що в мережі відбулось зростання її завантаженості. І навпаки, якщо обчислене значення є нижчим за базове на певну величину, то станція може вважати, що в мережі відбулось зниження її завантаженості. Таким чином, визначивши зростання/зниження завантаженості в мережі, станція може коригувати число категорій доступу при передачі з метою підвищення пропускної здатності.

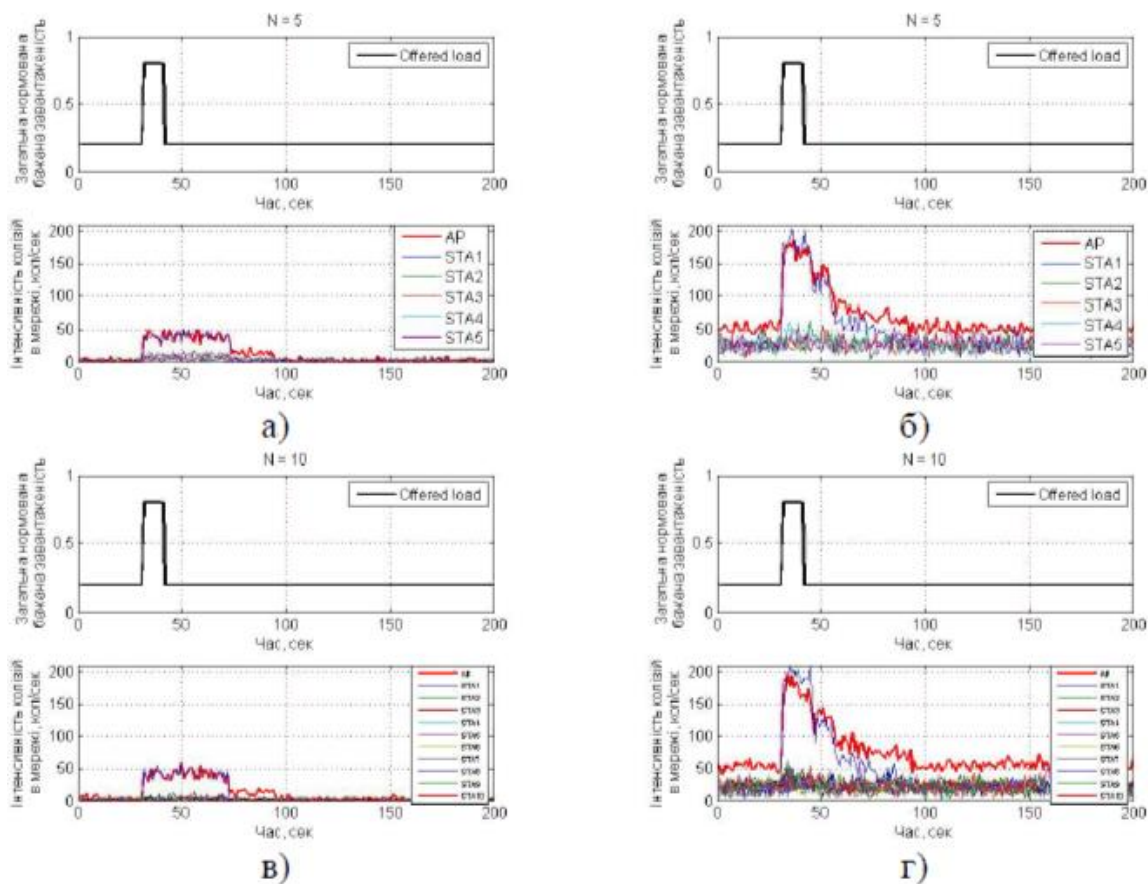


Рисунок 4.6 – Інтенсивність колізій в мережі з 5 та 10 станцій та при схемі поділу трафіку на а), в) одну та б), г) чотири категорії доступу відповідно

Аналіз зміни середнього часу доставки показав, що його величина змінюється щонайменше у 2-2.5 рази зі зростанням завантаженості в мережі з 20 до 80%. Тому, з урахуванням ефекту згладжування при застосуванні методу рухомого середнього, визначимо порогове значення зміни значення середнього часу доставки порівняно з базовим у 1.5 рази. На рисунку 4.7 зображено результати застосування методу рухомого середнього з довжиною вікна 5, 10 та 15 значень та з пороговим значенням зміни величини у 1.5 рази для схем доступу з однією та чотирма категоріями доступу.

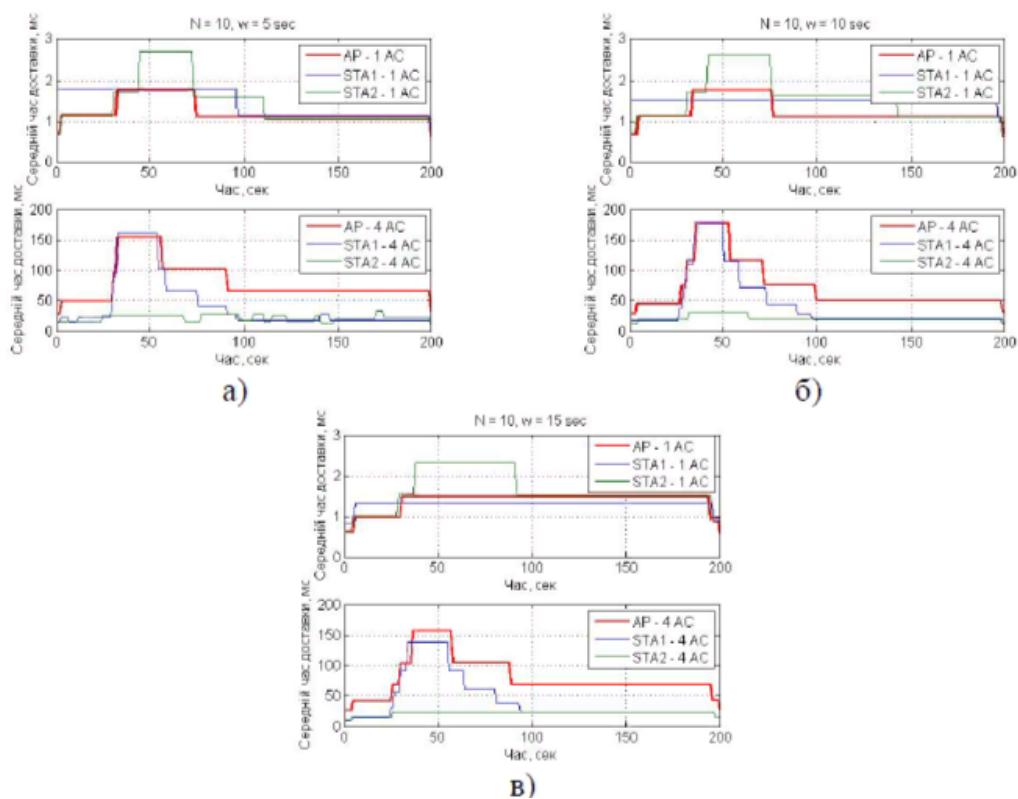


Рисунок 4.7 – Обчислене рухоме середнє з довжиною вікна а) 5, б) 10 та в) 15 значень та з пороговим значенням зміни величини у півтора рази для схем доступу з однією та чотирма категоріями доступу

Відповідно до алгоритму, станція, яка функціонує згідно схеми доступу з чотирма категоріями доступу, відчувши зростання завантаженості в мережі, має понизити число категорій доступу задля більш ефективного використання каналу. Як бачимо з рисунка 4.7, при застосуванні методу рухомого середнього обраний індикатор дозволяє станціям та точці доступу визначити початок зростання завантаженості – приблизно на 30-ій секунді, та, відповідно, прийняти рішення про зменшення числа категорій доступу.

Відчувши зниження завантаженості, станції можуть повернутись до схеми доступу з більшим числом категорій доступу. Розмір вікна для методу рухомого середнього впливає на чутливість станцій до зміни середнього часу доставки. Так, у випадку розміру вікна 15 значень (рисунок 4.7в) станція, яка спричинила зростання завантаженості в мережі, та точка доступу не “відчули” зниження завантаженості в мережі. У випадку розміру вікна 10 значень (рисунок 4.7б)

зниження завантаженості на основі зміни середнього часу доставки не “відчуває” станція, яка спричинила зростання завантаженості. І лише у випадку розміру вікна 5 значень (рисунок 4.7а), усі учасники мережі можуть збільшити число категорій доступу, відчувши зниження завантаження, тим самим підвищити якість обслуговування кадрів різних типів.

4.2 Алгоритм роботи схеми адаптивного вибору числа категорій доступу для схеми EDCA

4.2.1 Діаграма станів модифікованої схеми EDCA при передачі кадру

У вищепроведеному аналізі станція може приймати рішення щодо зміни числа категорій доступу для схеми EDCA, опираючись на аналіз даних попередніх передач кадрів. Тобто, станція мала б застосовувати адаптивний алгоритм зміни числа категорій доступу після отримання інформації щодо передачі кадру. Враховуючи вищевикладене, спрощена діаграма станів схеми доступу EDCA (рисунок 2.1) була розширена станами станції при використанні адаптивного алгоритму зміни числа категорій доступу (рисунок 4.8).

Для схеми EDCA стандартом передбачено чотири категорії доступу AC, кожна з яких має власну чергу для обслуговування. Кожна з черг функціонує згідно схеми DCF з урахуванням механізму вирішення внутрішньої колізії. Згідно рисунка 4.8, ключовим станом станції під час передачі кадру є стан прослуховування. Якщо в каналі не відчувається передача – канал вільний, то станція переходить зі стану прослуховування в стан backoff-алгоритму, який передуює фізичній передачі кадру. В іншому випадку, станція заморожує лічильник відтермінування, та очікує на звільнення каналу. Оскільки алгоритм відтермінування виконується для кожної з чотирьох категорій доступу, існує ймовірність одночасного завершення алгоритму відтермінування для двох та більше категорій доступу. В такому випадку, право на передачу отримує кадр з найвищим пріоритетом, для решти кадрів запускається механізм запобігання

колізій – збільшення вікна конкуренції для ініціалізації лічильника відтермінування.

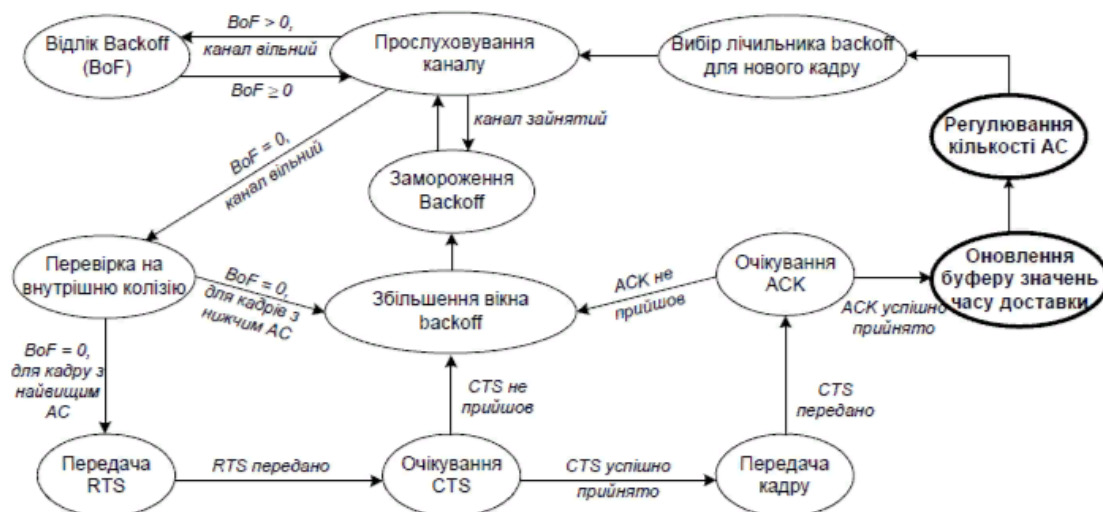


Рисунок 4.8 – Спрощена діаграма станів безпроводової станції на MAC-підрівні з адаптивним регулюванням числа категорій доступу

Відправивши кадр, станція переходить в стан очікування квитанції-підтвердження від адресата. Якщо у відповідь приходить кадр- підтвердження АСК, то кадр вважається переданим, інакше – кадр потрапив у колізію. Як бачимо, саме після отримання квитанції АСК станція може оцінити стан завантаженості мережі. Таким чином, адаптивний алгоритм регулювання кількості категорій доступу запускається після фіксації успішної передачі кадру.

В стані оновлення буферу значень часу доставки станція спершу обчислює величину проміжку часу між надходженням кадру в чергу та отриманням квитанції-підтвердження про його успішний прийом. Обчислена величина проміжку часу – час доставки кадру – зберігається у буфері станції. Розмір буферу станції обмежений та визначений розміром вікна методу рухомого середнього. Якщо буфер повний, то, перш ніж зберегти нове значення часу доставки, з нього виштовхується перший запис, решта записів буферу зсуваються, а нове значення часу доставки записується в кінець буферу. Відзначимо, що в буфері зберігаються значення часу доставки усіх кадрів, що передаються, незалежно від їх пріоритетів.

В стані регулювання кількістю категорій доступу АС станція обчислює середній час доставки для значень, збережених у буфері. Обчислене середнє значення станція порівнює з певною величиною часу доставки D_{base} , назвемо його – базовим. Базовий час доставки – це еталонна величина, відносно якої оцінюють зміну середнього часу доставки кадру станції в мережі для оцінки поточного стану її завантаженості. Він ініціалізується на початку функціонування станції в мережі та може бути обчислений як перше отримане середнє значення часу доставки, або як необхідний час для передачі кадру, обчислений згідно рисунка 1.4:

$$D_{base} = BoF \times SlotTime + (MAC_{hdr} + PHY_{hdr} + E[P] + ACK) / BR + SIFS + DIFS + 2\delta, \quad (4.1)$$

де BoF – середнє значення лічильника відтермінування, $SlotTime$ – тривалість слоту часу, MAC_{hdr} та PHY_{hdr} – розмір заголовку кадру відповідно на MAC та PHY рівнях, $E[P]$ – середній розмір тіла кадру, ACK – розмір квитанції-підтвердження, BR – швидкість передачі, $SIFS$ – величина короткого міжкадрового інтервалу, $DIFS$ – величина розподіленого міжкадрового інтервалу, δ – затримка поширення сигналу.

4.2.2 Адаптивний алгоритм зміни числа категорій доступу схеми EDCA при передачі кадру

Детальніше принцип роботи алгоритму регулювання кількості категорій доступу зображено у вигляді блок-схеми функціонування станції при передачі згідно схеми доступу EDCA з вбудованим адаптивним алгоритмом зміни числа категорій доступу (рисунок 4.9).

Станція запускає механізм передачі кадру, коли в чергу станції надходить кадр. Станція ініціалізує лічильник відтермінування VOF , межі діапазону його значень NAV , число повторних передач r . Далі станція переходить до прослуховування несучої на предмет виявлення передачі в ній. При вільному середовищі та відсутності внутрішньої колізії, станція розпочинає передачу. В

іншому випадку станція збільшує межі діапазону NAV для вибору значення лічильника зворотного відліку BOF.

Передавши кадр, станція протягом визначеного проміжку часу очікує на квитанцію-підтвердження АСК від адресата. Якщо АСК не отримано, припускається, що кадр попав у колізію, станція збільшує лічильник повторних передач r , межі діапазону NAV, вибирає значення лічильника відтермінування BOF в діапазоні значень $[0, NAV]$ та розпочинає повторну спробу передачі кадру. Зазвичай, число спроб повторної передачі обмежене, при досягненні максимального числа можливих повторних передач, кадр видаляється з черги та вважається непереданим.

Отримавши кадр-квитанцію АСК, станція може оцінити час, затрачений на передачу кадру, як різниця між часом надходження кадру в чергу станції та моментом отримання кадру-квитанції АСК. Отримане значення часу доставки станція зберігає у буфері, попередньо зсунувши усі його збережені значення часу доставки у випадку, якщо буфер повний.

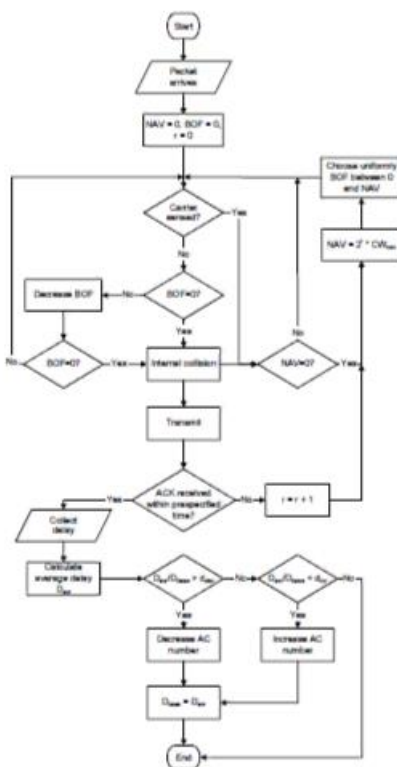


Рисунок 4.9 – Блок-схема функціонування станції на MAC-підрівні під час передачі з використанням адаптивного алгоритму зміни числа категорій доступу

Як було сказано раніше, розмір буферу обмежений та відповідає довжині вікна методу рухомого середнього – інтервал накопичення. Інтервал накопичення визначає кількість значень затримок попередніх передач кадрів, які необхідні для аналізу поточної завантаженості мережі. Згідно проведених досліджень, величина інтервалу накопичення має бути невеликою (5-10 секунд), аби станція (або точка доступу) могла відчувати зростання та падіння завантаженості в мережі.

Зберігши нове отримане значення часу доставки кадру, станція обчислює середнє значення затримки кадру (D_{avr}) для усього інтервалу накопичення, порівнює його з базовим (D_{base}) та приймає рішення щодо числа категорій доступу, які опрацюватимуться при наступній передачі кадру.

Рішення щодо зміни числа категорій доступу станція робить, аналізуючи відношення значення отриманого середнього часу доставки до базового. Якщо відношення середнього арифметичного значення часу доставки кадру для накопиченого інтервалу до базового значення є більшим, ніж певна величина d_{dec} , або меншим, ніж певна величина d_{inc} , то станція (або точка доступу) фіксує відповідно зростання або падіння завантаженості мережі та приймає рішення про зменшення або збільшення числа категорій доступу. Назвемо величини d_{dec} та d_{inc} індикаторами зміни. Змінивши число категорій доступу, станція зберігає обчислене середнє арифметичне значення часу доставки як нове базове.

В дослідженнях було показано, що середній час доставки при зростанні/падінні завантаженості мережі змінюється в 2-2.5 рази. Враховуючи, що усереднення на певному інтервалі часу згладжує різку зміну середнього часу доставки, то індикатор зміни середнього часу доставки слід вибрати меншим, ніж 2-2.5.

Стандартом 802.11 визначено чотири категорії доступу, кожна з яких має власну чергу кадрів. Оскільки в стандарті безпроводових мереж відсутній механізм динамічної зміни числа черг, то в адаптивному алгоритмі реалізовано механізм опрацювання черг, коли число категорій доступу відрізняється від їх кількості. При зменшенні кількості категорій доступу створюється матриця перетворення

між набором черг згідно стандарту та набором черг згідно адаптивного алгоритму. Як і передбачено стандартом, кожна черга функціонує згідно схеми DCF. Право на передачу отримує той кадр, чий лічильник зворотного відліку стане рівним нулю. У випадку, коли лічильник зворотного доступу стає рівним нулю одночасно для декількох черг, асоційованих з однією категорією доступу, то право на передачу отримує кадр з найвищим пріоритетом, за умови, що він не потрапить у внутрішню колізію з кадром іншої категорії доступу. Для решти кадрів, на відміну від стандартної процедури вирішення внутрішньої колізії, лічильник зворотного відліку залишається рівним нулю, та кадри будуть передані, коли канал знову стане вільним. На рисунку 4.10 зображено приклад обслуговування кадрів з чотирьох черг для двох категорій доступу.

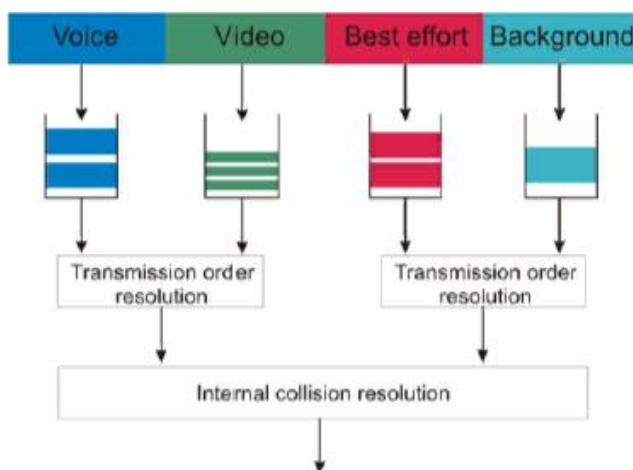
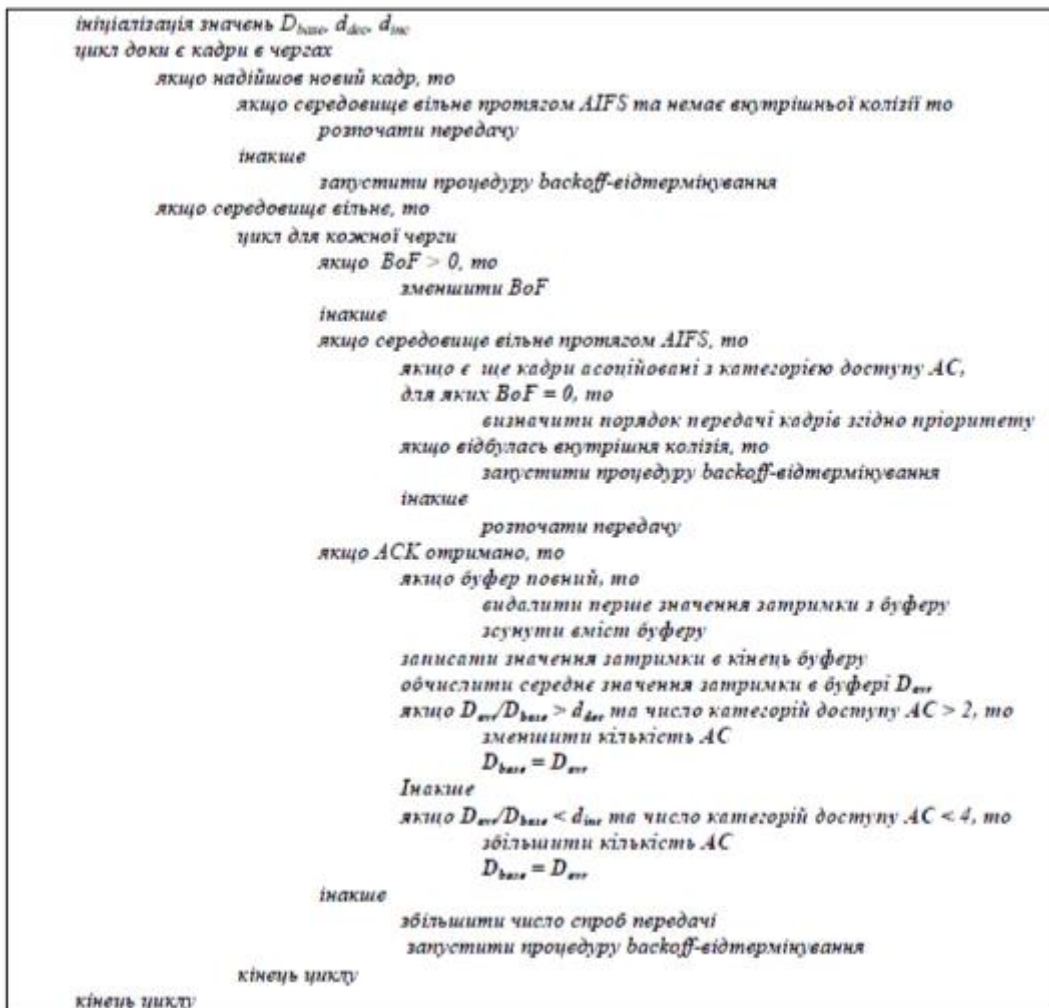


Рисунок 4.10 – Механізм передачі кадрів з чотирьох черг при двох категоріях доступу

Підсумовуючи, наведемо алгоритм функціонування модифікованої схеми EDCA при передачі кадру у вигляді псевдокоду (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 - Адаптивний алгоритм зміни числа категорій доступу схеми EDCA



Як бачимо, впровадження адаптивного регулювання числа категорій доступу не порушує базовий алгоритм функціонування станції на MAC- підрівні, не вимагає його суттєвих змін, а є лише доповненням до нього. Це дозволяє спростити та знизити вартість процесу впровадження адаптивного алгоритму в існуючі мережеві вузли.

Регулюючи якість обслуговування шляхом адаптивної зміни числа категорій доступу, даний алгоритм дозволить передавати більший об'єм трафіку за умови завантаженості мережі порівняно зі стандартною схемою доступу EDCA.

4.3 Аналіз роботи схеми адаптивного вибору числа категорій доступу для схеми EDCA

Запропонований алгоритм роботи схеми адаптивного вибору числа категорій доступу було реалізовано у розробленому симуляторі.

Для перевірки роботи алгоритму параметри MAC та фізичного рівнів безпроводової мережі були налаштовані згідно таблиці 3.1. Безпроводова мережа функціонувала в режимі Infrastructure Mode та обслуговувала 2, 10 або 30 станцій, що відповідає малим, середнім та великим розмірам мережі відповідно. Дослідження також були проведені для різних значень параметрів алгоритму. Так, статистичний інтервал накопичення становив 5, 10 або 15 секунд, а індикатор зміни d_{dec} – 1.3, 1.5 або 2. Для простоти було припущено, що $d_{inc} = 1/d_{dec}$.

На рисунку 4.11 зображено загальну пропускну здатність безпроводової мережі різних розмірів з використанням схеми доступу EDCA з адаптивним вибором числа категорій доступу. При цьому додатково зображено загальну пропускну здатність мережі для схеми EDCA без поділу на категорії доступу та з поділом на дві та чотири категорії доступу. Як бачимо, для невеликих мереж (рисунок 4.11a) застосування адаптивної зміни числа категорій доступу дає змогу збільшити загальну пропускну здатність мережі на 3-4%. Для безпроводової мережі середніх та великих розмірів адаптивний вибір числа категорій доступу забезпечує загальну пропускну здатність вищу відповідно на 4-8% та на 23-42%, ніж для схеми доступу EDCA з чотирма категоріями доступу.

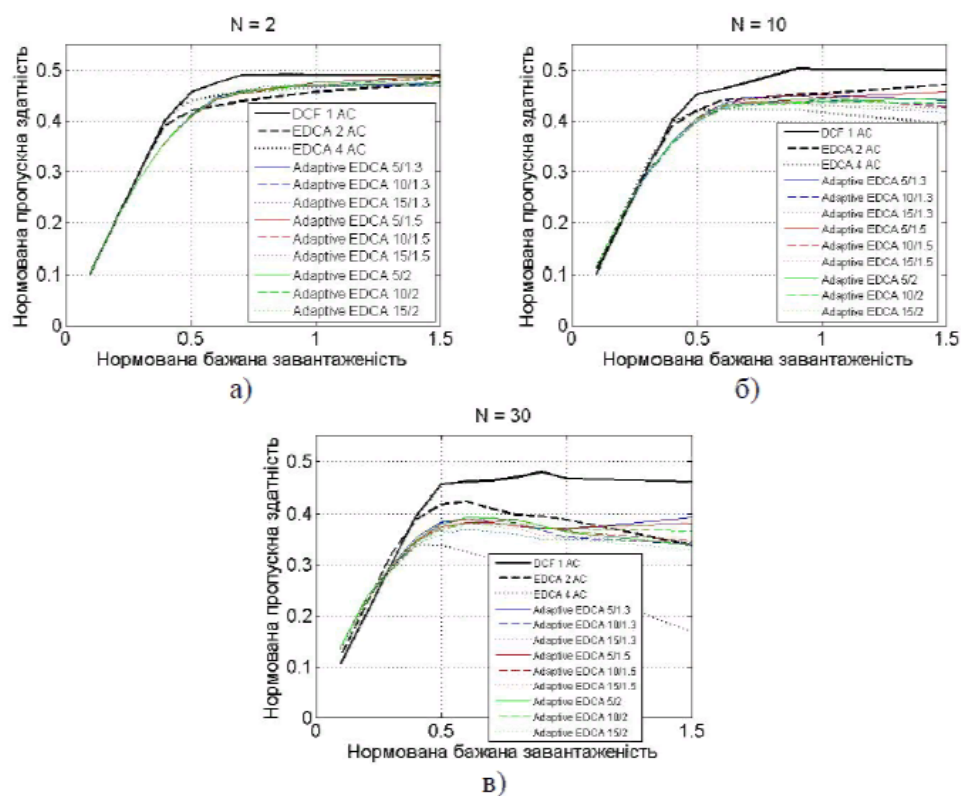


Рисунок 4.11 – Загальна нормована пропускна здатність для мережі з а) 2, б) 10 та в) 30 станцій та при схемі EDCA з адаптивним вибором числа категорій доступу

Якщо аналізувати вплив розміру статистичного інтервалу накопичення та величину індикатора зміни, то розкид значень між кривими залежностей невеликий та не перевищує значення 0.06. Проте вища пропускна здатність при завантаженості мережі $> 40\%$ забезпечується при використанні короткого статистичного інтервалу накопичення 5 значень та індикатора зміни 1.3 та 1.5. При цьому для великих мереж (рисунок 4.11в) при таких параметрах алгоритму та при насиченій завантаженості мережі величина вихідного трафіку мережі є вищою, ніж для схеми EDCA з двома категоріями доступу \approx на 12-16%.

Тобто, у випадку насичено завантаженості мережі, адаптивний алгоритм зміни числа категорій доступу може вдвічі збільшити загальну кількість переданого трафіку.

Розглянемо зміну середнього часу доставки кадру в мережі для даного експерименту (рисунок 4.12). Для мережі з двох станцій (рисунок 4.12а) та при

завантаженості $> 80-100\%$ середній час доставки кадру для схем з адаптивним вибором числа категорій становить 20-40 мс, що в середньому на 20-23% нижче, ніж для стандартної схеми EDCA з чотирма категоріями доступу. Для високої завантаженості ($> 100\%$) ця різниця для деяких схем з адаптивним вибором числа категорій становить ≈ 35 мс, тобто середній час доставки більш ніж вдвічі нижчий за значення середнього часу доставки для стандартної схеми EDCA з чотирма категоріями доступу. Найнижчі значення середнього часу доставки в діапазоні завантажених $> 70\%$ забезпечуються адаптивною схемою при використанні статистичного інтервалів накопичення в 5-10 значень та індикатору зміни 1.5-2.

Для мережі середнього розміру (рисунок 4.12б) при завантаженості $> 50\%$ середній час доставки кадру для адаптивних схем є нижчим на 20-40%, ніж для стандартної схеми EDCA. В діапазоні завантажених 50-90% найнижчі показники середнього часу доставки отримано для адаптивної схеми зі статистичним інтервалом накопичення рівним 5 та 10 значень з індикатором зміни 1.5 та для інтервалу в 5 значень з індикатором зміни 1.3. У випадку насиченої завантаженості отримуємо, що середній час доставки кадру для більшості адаптивних схем стає таким, як для схеми EDCA з двома категоріями доступу. А для адаптивної схеми зі статистичним інтервалом накопичення 5 значень та індикатором зміни 1.5 середній час доставки кадру на 21% нижчий, ніж середній час доставки для схеми EDCA з двома категоріями доступу.

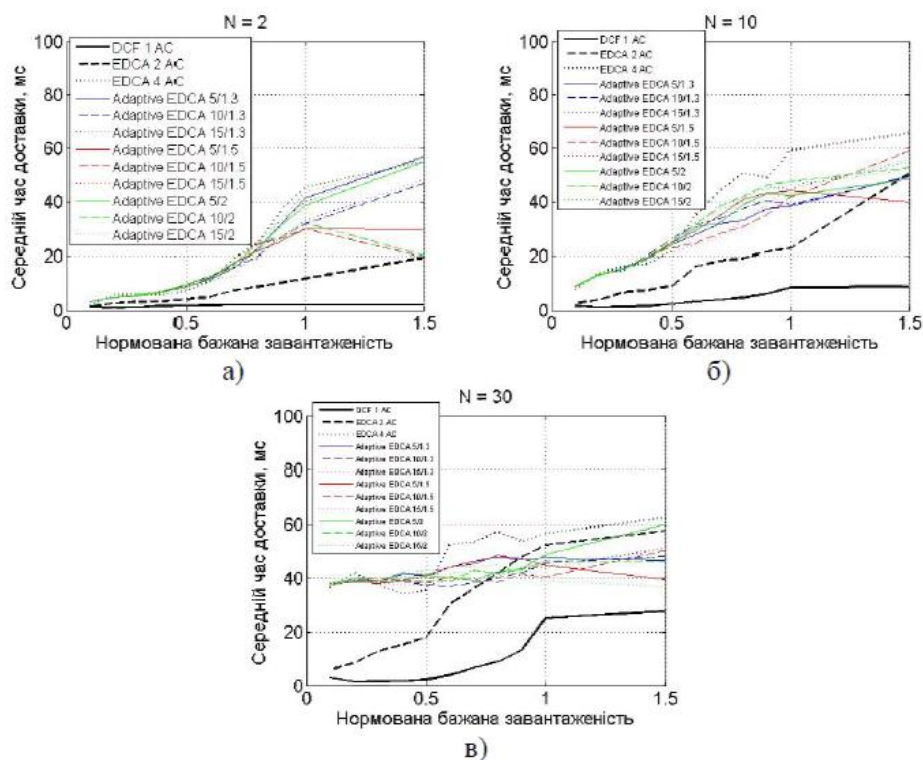


Рисунок 4.12 – Середній час доставки кадру для мережі з а) 2, б) 10 та в) 30 станцій та при схемі EDCA з адаптивним вибором числа категорій доступу

У випадку великої мережі (рисунок 4.12в) отримуємо схожий результат – середній час доставки для адаптивних схем нижчий на $\approx 20-30\%$, ніж для стандартної схеми EDCA з чотирма категоріями доступу. Найкращі результати отримуємо для адаптивної схеми зі статистичним інтервалом 10 та 15 значень і індикаторами зміни 1.5 та 2. Якщо завантаженість мережі стає насиченою, то середній час доставки кадру для адаптивних схем є нижчий в середньому на 25%, ніж для схеми EDCA з чотирма категоріями доступу. Тобто, схема доступу з адаптивним вибором числа категорій доступу є досить ефективною для високих значень завантаженості мережі.

На рисунку 4.13 зображено інтенсивність колізій в мережі для вищеприписаного експерименту. Для невеликих мереж (рисунок 4.13а) при застосуванні адаптивної схеми вибору числа категорій доступу рівень інтенсивності колізій знаходиться в діапазоні значень інтенсивностей для стандартної схеми EDCA та схеми EDCA з двома категоріями доступу. По мірі зростання числа станцій в мережі використання адаптивної схеми доступу

дозволяє знизити рівень інтенсивності колізій на 26-48% у випадку завантаженості мережі рівній одиниці, що відповідає 100%.

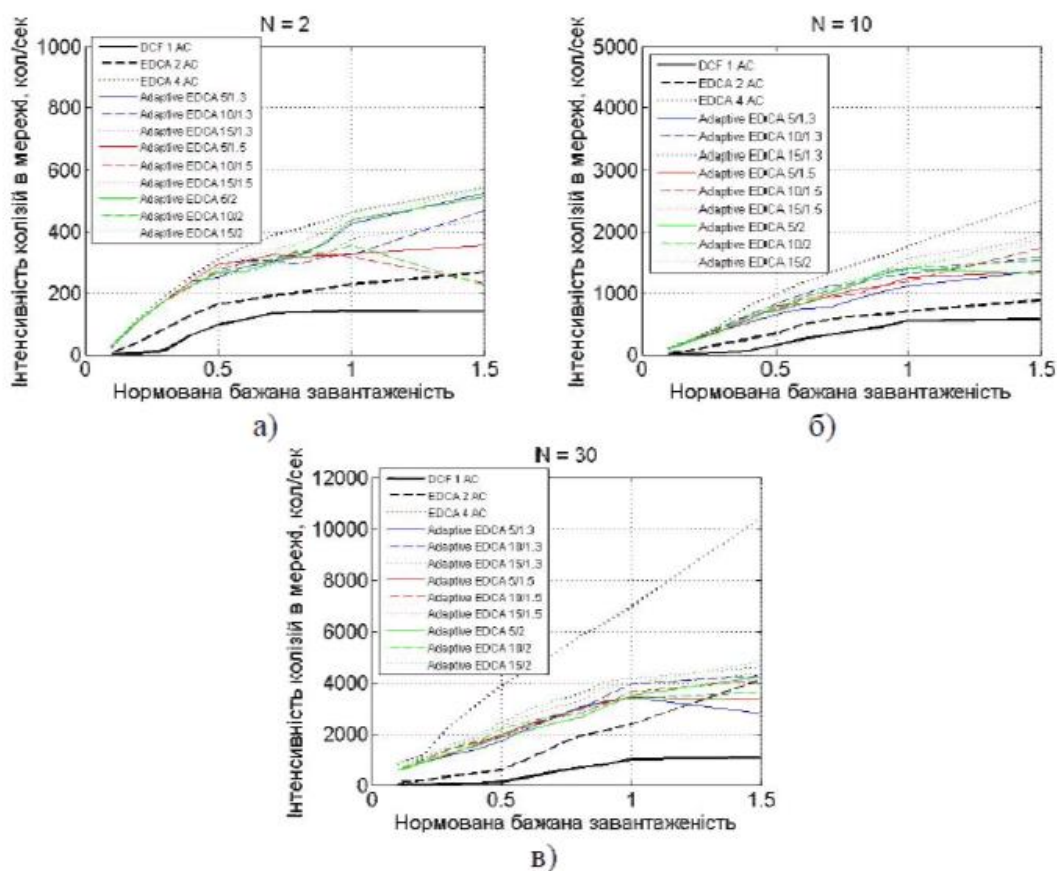


Рисунок 4.13 – Інтенсивність колізій для мережі з а) 2, б) 10 та в) 30 станцій та при схемі EDCA з адаптивним вибором числа категорій доступу

Отже, можемо підсумувати, що запропонована схема адаптивної зміни числа категорій доступу покращує загальні характеристики безпроводової мережі: підвищує загальну пропускну здатність мережі на 20-40%, знижує середній час доставки кадру та рівень інтенсивності колізій на 30-40% та 26- 48% відповідно.

При цьому чим більше станцій в мережі та чим більша завантаженість мережі, тим сильніший ефект дає адаптивна зміна числа категорій доступу. При високій завантаженості найбільш ефективна робота схеми з адаптивною зміною числа категорій доступу забезпечується при використанні короткого статистичного інтервалу накопичення (5-10 значень) та індикатору зміни 1.3-1.5.

Розглянемо для даного експерименту на прикладі мережі з 10 та 30 станцій як забезпечується якість обслуговування високо- та низькопріоритетного трафіку.

На рисунках 4.14 та 4.15 зображено пропускну здатність та середній час доставки кадру для високопріоритетного трафіку в мережі, яка складається з 10 та 30 станцій відповідно.

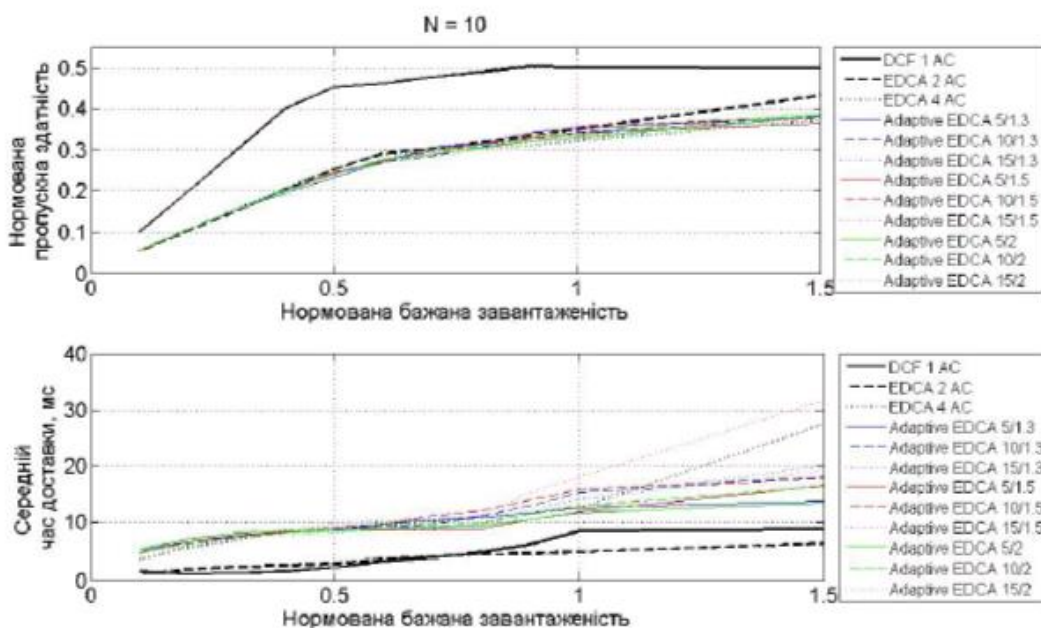


Рисунок 4.14 – Нормована пропускну здатність та середній час доставки кадру для високопріоритетного трафіку мережі з 10 станцій для схеми з адаптивним вибором числа категорій доступу

У випадку мережі з 10 станцій (рисунок 4.14) значний приріст переданого високопріоритетного трафіку згідно запропонованої схеми адаптивної зміни числа категорій доступу не спостерігається. Проте і різниця в пропускну здатності мережі, яка працює згідно схеми EDCA з двома та чотирма категоріями доступу, становить при насиченій завантаженості мережі 0.03-0.05. Середній час доставки при ненасиченій завантаженості мережі для стандартної схеми EDCA з чотирма категоріями та для схем з адаптивною зміною числа категорій доступу змінюється в межах від 5 до 15 мс. Проте, при насиченій завантаженості середній час доставки для стандартної схеми EDCA практично в 1.5-2 рази вищий, ніж для адаптивної схеми EDCA. Найнижчі значення середнього часу доставки кадру отримано для адаптивної схеми з довжиною статистичного інтервалу накопичення 5 значень.

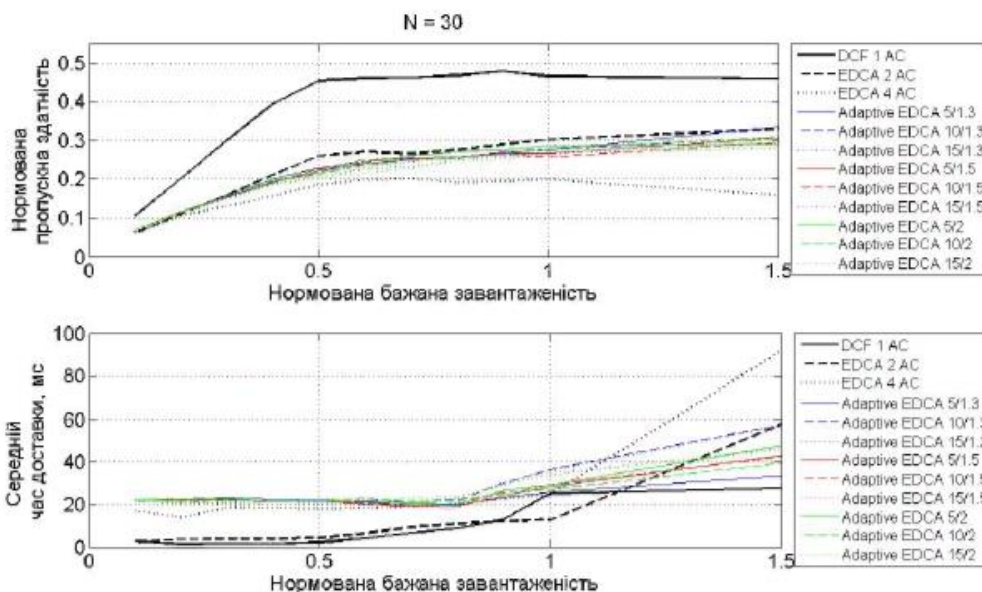


Рисунок 4.15 – Нормована пропускна здатність та середній час доставки кадру для високопріоритетного трафіку мережі з 30 станцій для схеми з адаптивним вибором числа категорій доступу

На рисунку 4.15 зображено пропускну здатність та середній час доставки кадру для високопріоритетного трафіку мережі, яка складається з 30 станцій. В даному випадку величина переданого високопріоритетного трафіку в мережі, яка працює згідно адаптивної схеми EDCA, на 0.04-0.08 або на 25-40% вище, ніж для стандартної схеми EDCA з чотирма категоріями доступу в діапазоні завантаженості мережі 40-100 %. Позитивний ефект від застосування адаптивної зміни числа категорій доступу спостерігається і для значення середнього часу доставки високопріоритетних кадрів при насиченій завантаженості мережі. Так, при завантаженості мережі 1.5 для більшості адаптивних схем середній час доставки кадру практично в два рази нижчий, ніж для стандартної схеми EDCA, а для адаптивної схеми зі статистичним інтервалом накопичення 5 значень та індикатором зміни 1.3 – в три рази.

Адаптивна зміна числа категорій доступу також позитивно впливає і на інтенсивність колізій для високопріоритетного трафіку (рисунок 4.16). Для безпроводової мережі з 10 станцій інтенсивність колізій для адаптивних схем практично в два рази нижча за інтенсивність колізій для стандартної схеми

доступу з чотирма категоріями доступу. Так само і для мережі, яка складається з 30 станцій, адаптивна зміна числа категорій дозволяє знизити інтенсивність колізій вдвічі, а при насиченій завантаженості – майже в три рази.

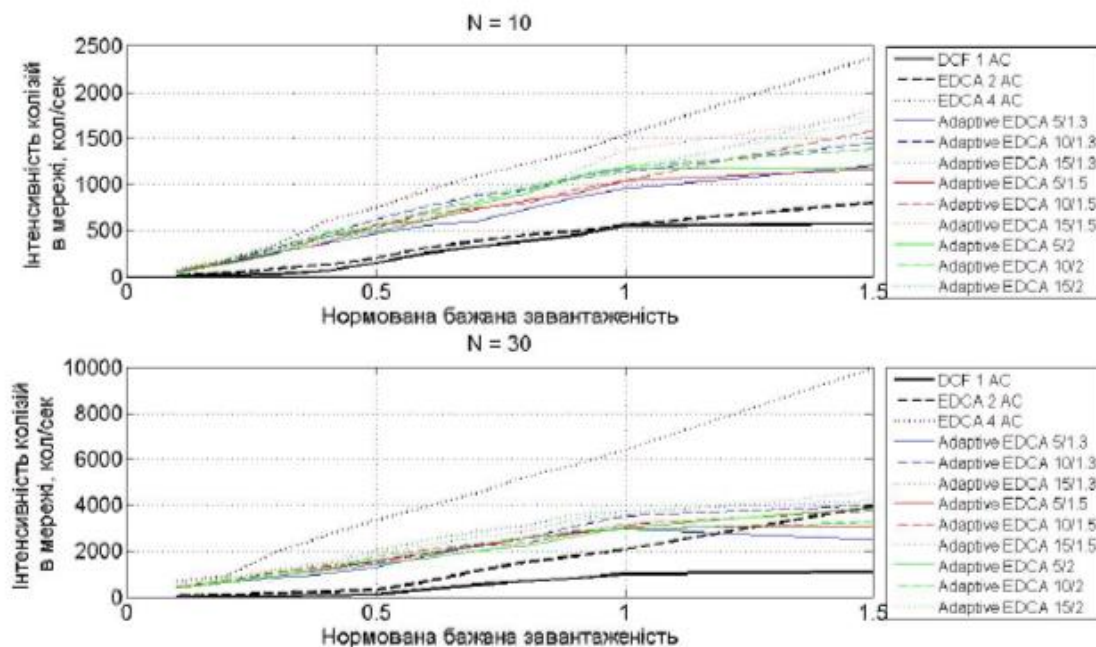


Рисунок 4.16 – Інтенсивність колізій для високопріоритетного трафіку мережі для схеми з адаптивним вибором числа категорій доступу

Отже, можемо підсумувати, що адаптивна зміна числа категорій доступу для мереж середнього та великого розмірів дозволяє підвищити якість обслуговування високопріоритетного трафіку. Так, чим більша мережа та чим вища її завантаженість, тим вищу пропускну здатність дозволяє забезпечити використання алгоритму адаптивної зміни числа категорій доступу в схемі доступу EDCA. Також знижується рівень колізій в мережі – практично в 2-3 рази. Проте відзначимо, що часові характеристики можна покращити при дуже високій або насиченій завантаженості мережі. Адаптивний алгоритм є чутливий до вибору параметрів, особливо при високих завантаженнях (50-90%). Найбільш ефективні результати без різких змін залежностей отримано для статистичного інтервалу 5 значень та індикатору зміни 1.5.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі проведено теоретичне обґрунтування та отримано нове вирішення проблеми покращення роботи MAC-підрівня безпроводових мереж за допомогою розробленої інформаційної технології симуляції роботи MAC-підрівня безпроводової мережі. Розроблена імітаційна модель дозволила широко дослідити доступ до фізичного середовища на MAC-підрівні. На основі отриманих результатів дослідження запропоновано адаптивний метод підвищення загальної продуктивності MAC-підрівня безпроводових мереж.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Розроблена інформаційна технологія симуляції роботи MAC- підрівня безпроводової мережі дає змогу досліджувати методи доступу до фізичного середовища на MAC-підрівні безпроводових мереж за різноманітних умов функціонування та стану середовища, вносити зміни в алгоритми функціонування MAC-підрівня та характеристики потоків трафіку, а також моделювати та аналізувати розгалужені безпроводові мережі.

2. Розроблена імітаційна модель MAC-підрівня добре узгоджується з аналітичними моделями, симулятором NS-2 та даними фізичних вимірювань, різниця результатів моделювання знаходиться в межах 5-12 %, що є достатнім [95].

3. Для безпроводових мереж зі схемою доступу EDCA при збільшенні числа категорій доступу зменшується загальна пропускна здатність мережі на 15-40%. При цьому схема EDCA є чутливою як до числа категорій доступу, так і до завантаженості мережі та до числа станцій в мережі, чим вищі показники цих характеристик, тим менш ефективною є робота безпроводової мережі.

4. Зменшення числа категорій доступу в схемі EDCA до двох дозволяє зберегти досить високу загальну пропускну здатність мережі (вищу в 1.2 та 1.8 рази для мереж середнього та великого розмірів відповідно) та забезпечити

кращий доступ високопріоритетного трафіку (для мережі середнього розміру величина переданого високопріоритетного трафіку вища на $\approx 30\%$).

5. Зростання частки високопріоритетного трафіку для стандартної схеми доступу EDCA знижує загальну пропускну здатність MAC- підрівня великих мереж на 30-35%.

6. Згідно аналізу відгуків безпроводової мережі на раптові короткотривалі зростання завантаженості однієї зі станцій безпроводової мережі, чинником механізму прийняття рішень адаптивного алгоритму зміни числа категорій доступу для схеми EDCA може бути зміна середнього часу доставки кадру.

7. Запропонований алгоритм адаптивної зміни числа категорій доступу динамічно оцінює поточний стан безпроводової мережі та дозволяє підвищити ефективність роботи MAC-підрівня безпроводової мережі загалом та якість обслуговування високопріоритетного трафіку. Так, для великої мережі (30 станцій) при високих значеннях бажаної завантаженості мережі ($> 60\%$) адаптивна зміна числа категорій доступу підвищує загальну пропускну здатність мережі (на 20-46%), знижує середній час доставки кадру (на 30-40%) та рівень інтенсивності колізій (на 26- 48%). Крім того, частка переданого високопріоритетного трафіку зростає на 30-50% порівняно зі стандартною схемою доступу, а середній час доставки високопріоритетного кадру знижується на 60%.

8. Найефективніша робота запропонованої схеми з адаптивною зміною числа категорій доступу забезпечується при використанні короткого статистичного інтервалу накопичення (5-10 значень) та індикатору зміни 1.3-1.5.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. IEEE Std 802.11, IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification.
2. IEEE Std 802.11ad-2018, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band, 2018.
3. Li T. A new MAC scheme for very high-speed WLANs / T. Li, Q. Ni, D. Malone, D. Leith, Y. Xiao, T. Turletti // IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), Buffalo-NY, USA, June 2006. – P.171-180.
4. Ni Q. AFR Partial MAC Proposal for IEEE 802.11n / Q. Ni, T. Li, T. Turletti, Y. Xiao // IEEE 802.11n Working Group Document: IEEE 802.11- 04-0950-00-000n, August 13, 2014.
5. IEEE Std 802.11-2017, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2017.
6. Li T. Performance Analysis of the IEEE 802.11e Block ACK Scheme in a Noisy Channel / Q. Ni, T. Turletti, Y. Xiao // 2nd International Conference on Broadband Networks, Boston, MA, USA, October 3-7, 2015. – P.511- 517.
7. Xiao Y. Performance analysis and enhancement for the current and future IEEE 802.11 MAC protocols / Y. Xiao, J. Rosdahl // ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review (MC2R), special issue on Wireless Home Networks. – 2013. – 7(2). – P.6-19.
8. Perahia E. Next Generation Wireless LANs: Throughput, Robustness, and Reliability in 802.11n / E. Perahia, R. Stacey. – Cambridge University Press, 2018. – 416p.
9. He J. Analytical Model for Service Differentiation Schemes in IEEE 802.11 Wireless LAN / J. He, L. Zheng, Z. Yang, C.T. Chou, Z. Tang // IEICE Transactions on Communications. – 2014. – 87(6). – P.1724-1729.

10. Xiao Y. A simple and effective priority scheme for IEEE 802.11 / Y. Xiao // IEEE. Communication Letters. – 2020. – 7(2). – P.70-72.
11. Taal J.R. Quality of service controlled adaptive video-coding over IEEE 802.11 wireless links / J.R. Taal, I. Haratcherev, K. Langendoen, R. Lagendijk // Proceedings of the 2003 International Conference on Multimedia and Expo. – 2017. – 1. – P.189-192.
12. Choi S. IEEE 802.11e Contention-Based Channel Access (EDCF) Performance Evaluation / S. Choi, J. Prado, S. Shankar, S. Mangold // Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Anchorage, Alaska, May 2021. – 2. – P.1151-1156.
13. Thornycroft P. Designed for speed: Network infrastructure in an 802.11n world / P. Thornycroft // Aruba Networks: White Paper. – 2017. – V2.7.
14. Tan G. The 802.11 MAC protocol leads to inefficient equilibris / G. Tan, J. Guttag // Proceedings of the 24th IEEE Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'05), Miami, Fla, USA, March 2005. – 1. – P.1-11.
15. Ci S. Adaptive Optimal Frame Length Predictor for IEEE 802.11 Wireless LAN / S. Ci, H. Sharif // Proceedings of 6th International Symposium on Digital Signal Processing for Communication Systems 2012. – P.59-63.
16. Skordoulis D. Hadjinicolaou, M., Analysis of Concatenation and Packing Mechanisms in IEEE 802.11n / D. Skordoulis, Q. Ni, U. Ali // PGNET 2007, Liverpool, UK, June 2017.
17. Bansal A. Mandating QoS in Wireless LANs: White Paper [Электронный ресурс] / A. Bansal // NewLogic Technologies. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: http://www.newlogic.com/products/802_11_wireless_abg/mandating_qos_in_wireless_lans.pdf.
18. Changwen L. Delayed Channel Access for IEEE 802.11e Based WLAN / L. Changwen, A.P. Stephens // IEEE International Conference on Communication, June 2016. – 10. – P.4811-4817.

19. Skordoulis D. Adaptive delayed channel access for IEEE 802.11n WLANs /D. Skordoulis, Q. Ni, G. Min, K. Borg // Proceedings of the IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications (ICCSC2008), May 26-28, 2008, Shanghai, China. – P.167-171.

20. Skordoulis D. A selective delayed channel access (SDCA) for the high-throughput IEEE 802.11n / D. Skordoulis, Q. Ni, C. Zarakovitis // Proceedings of the 2019 IEEE conference on Wireless Communications & Networking Conference, Budapest, 5-8 April 2019. – P.1-6.

21. Lin Y.S. Scheduling Mechanism for WLAN Frame Aggregation with Priority Support / Y.S. Lin, J.Y. Wang, W.S. Hwang // Proceedings of the 2016 Joint Conference on Information Sciences, JCIS 2016, Kaohsiung, Taiwan, ROC, October 8-11, 2016. – P.844-847.

22. Ni J. Distributed CSMA/CA Algorithms for Achieving Maximum Throughput in Wireless Networks / J. Ni, R. Srikant // 2019 Information Theory and Applications Workshop (ITA), San Diego, California, February 2019.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ