

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет “Львівська політехніка”

На правах рукопису

ПАНОВА ОЛЬГА СЕРГІЇВНА



УДК 004.94+004.728.3.057.4

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ  
ДОСТУПОМ ДО ФІЗИЧНОГО  
СЕРЕДОВИЩА БЕЗПРОВІДНИХ  
КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ**

Спеціальність 05.13.06 – Інформаційні технології

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник:

Обельовська Квітослава Михайлівна

к.т.н., доцент

Ідентичність всіх примірників дисертації  
ЗАСВІДЧУЮ:  
Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



А.С. Батюк

Львів - 2017

## Зміст

<b>Зміст .....</b>	<b>2</b>
<b>Перелік умовних скорочень .....</b>	<b>4</b>
<b>Вступ .....</b>	<b>5</b>
<b>Розділ 1 Аналіз безпроводних комп'ютерних мереж, моделей та методів доступу до фізичного середовища.....</b>	<b>12</b>
1.1. Режими роботи безпроводних мереж на МАС-підрівні .....	12
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 безпроводних мереж .....	22
1.4. Моделювання безпроводних мереж на МАС-підрівні .....	27
1.4.1. Аналітичне моделювання .....	28
1.4.2. Імітаційне моделювання .....	35
1.5. Висновки до розділу .....	39
<b>Розділ 2 Розробка імітаційної моделі МАС-підрівня безпроводної мережі.....</b>	<b>42</b>
2.1. Аналіз предметної області дослідження.....	42
2.2. Елементи моделі МАС-підрівня безпроводної мережі та їх взаємозв'язок .....	46
2.3. Моделі потоку трафіку та стану середовища безпроводної мережі .....	58
2.4. Верифікація результатів роботи імітаційної моделі МАС-підрівня.....	65
2.4.1. Верифікація за допомогою аналітичних моделей.....	65
2.4.2. Верифікація за допомогою симулятора NS-2.....	77
2.4.3. Верифікація за допомогою фізичних експериментів .....	82

2.5. Висновки до розділу .....	86
<b>Розділ 3 Дослідження продуктивності роботи MAC-підрівня безпроводної мережі .....</b>	<b>90</b>
3.1. Дослідження загальної пропускної здатності безпроводної мережі .....	90
3.2. Вплив співвідношення трафіків на продуктивність роботи безпроводної мережі .....	101
3.3. Дослідження забезпечення безпроводною мережею якості передачі високопріоритетного трафіку .....	107
3.4. Висновки до розділу .....	114
<b>Розділ 4 Вдосконалення методу доступу до фізичного середовища з пріоритетним обслуговуванням .....</b>	<b>117</b>
4.1. Вибір та обґрунтування чинників механізму прийняття рішень адаптивного алгоритму регулювання числа категорій доступу схеми EDCA .....	117
4.2. Алгоритм роботи схеми адаптивного вибору числа категорій доступу для схеми EDCA .....	127
4.2.1. Діаграма станів модифікованої схеми EDCA при передачі кадру .....	127
4.2.2. Адаптивний алгоритм зміни числа категорій доступу схеми EDCA при передачі кадру .....	130
4.3. Аналіз роботи схеми адаптивного вибору числа категорій доступу для схеми EDCA .....	135
4.4. Висновки до розділу .....	143
<b>Висновки .....</b>	<b>145</b>
<b>Література .....</b>	<b>147</b>
<b>Додатки .....</b>	<b>161</b>
Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження .....	161

## Перелік умовних скорочень

Скорочення, термін, позначення	Пояснення
AC	Access category – категорія доступу
ACK	Acknowledgement – кадр підтвердження
AIFS	Arbitration interframe space – арбітражний міжкадровий проміжок часу
AP	Access point – точка доступу
BER	Bit error rate – коефіцієнт бітових помилок
BoF	Backoff – проміжок зворотного відліку
BR	Bitrate – швидкість передачі
BSS	Basic Service Set – базовий набір служб
CSMA/CA	Carrier sense multiple access with collision avoidance – метод множинного доступу з прослуховуванням несучої та запобіганням колізій
CSMA/CD	Carrier sense multiple access with collision detect – метод множинного доступу з прослуховуванням несучої та виявленням колізії
CTS	Clear to send – кадр дозволу на передачу
CW	Contention window – вікно конкуренції
DCF	Distributed coordination function – схема розподіленого управління
DIFS	Distributed interframe space – міжкадровий проміжок часу
EDCA	Enhanced distributed channel access – покращений розподілений метод доступу до середовища
MAC	Media access control – підрівень управління доступом до середовища
MPDU	MAC protocol data unit – кадр даних MAC-підрівня
MSDU	MAC service data unit – кадр службових даних MAC-підрівня
OSI	Open Systems Interconnection Basic Reference Model – базова еталонна модель взаємодії відкритих систем
PHY	Physical layer – фізичний рівень
QoS	Quality of service – якість обслуговування
RTS	Request to send – кадр запиту на передачу
SD	Standard-definition – стандартна чіткість
SIFS	Short interframe space – короткий між кадровий проміжок часу
STA	Station – станція
TXOP	Transmission opportunity – вільний від конкуренції проміжок часу

## Вступ

Сьогодення важко уявити без існування безпроводного зв'язку. Сфери діяльності людства дедалі тісніше переплітаються з інформаційними технологіями, зокрема й з засобами безпроводного 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 безпроводний зв'язок набув стрімкого розвитку. Швидкість передачі сигналів за цей час зросла в сотні разів [1, 2]. Тим не менше, реальна пропускна здатність безпроводних мереж, вимірювана на каналному рівні, значно нижча [3, 4].

Безпроводне середовище передачі є спільним для усіх вузлів мережі, тому для забезпечення рівноправного доступу до фізичного середовища використовуються конкурентні методи доступу [5]. В умовах конкуренції та використання спільного середовища суттєвий вплив на ефективність роботи безпроводних мереж мають процеси, які відбуваються на підрівні доступу до фізичного середовища. Оскільки значним недоліком безпроводних мереж є неможливість вузлом мережі “відчути” 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 провідних 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 пропускну здатності навіть при використанні найефективніших технологій фізичного рівня [6, 7]. Наприклад, при функціонуванні безпроводної мережі згідно специфікації стандарту 802.11n її пропускну здатність практично в п'ять разів нижча, ніж швидкість передачі сигналів [3].

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

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

Дослідження публікацій фахівців у даній області, зокрема, Bianchi G., Cali F., Conti M., Gregory E., Duffy K., Engelstad P., Osterbo O., Ni Q., Malone D., Li T., Leith D., Xiao Y., Turletti T., Вишневського В.М., Ляхова А.І., Шахновича І.В. та ін. говорять про те, що схема розподіленого доступу до фізичного середовища на MAC-підрівні досі є вузьким місцем, попри численні запропоновані методи її оптимізації.

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 безпроводних комп'ютерних мереж з метою підвищення пропускної здатності, зменшення часових затримок та рівня колізій.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Основу роботи складають результати теоретичних та практичних досліджень, виконаних автором самостійно та в рамках навчальних та науково-дослідних робіт кафедри автоматизованих систем управління Національного університету “Львівська політехніка”, зокрема за держбюджетною темою “Розроблення компонентів для синтезу інтегрованих автоматизованих систем управління” (0114U001232).

### **Мета і завдання дослідження.**

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності безпроводних комп'ютерних мереж шляхом розроблення моделей, методів та засобів управління доступом до фізичного середовища. Досягнення поставленої мети передбачало розв'язання таких завдань:

1) аналіз безпроводних комп'ютерних мереж, моделей та методів управління доступом до фізичного середовища і формулювання вимог та напрямків покращення їх характеристик;

2) розроблення методу адаптивного управління доступом до фізичного середовища на основі накопичення та статистичної обробки даних попередніх передач;

3) розроблення моделі вхідного трафіку в мережі, яка дозволить дослідити різні режими роботи MAC-підрівня мережі;

4) розроблення моделі аналізу режимів доступу до фізичного середовища на основі зміни параметрів мережі для оцінювання та вибору методу доступу з підвищеною пропускнуою здатністю для конкретного стану мережі;

5) розроблення методу підвищення ефективності роботи безпроводної мережі за рахунок вибору числа категорій доступу в залежності від біжучої завантаженості мережі;

6) вдосконалення методу розподіленого доступу до фізичного середовища з пріоритетним обслуговуванням, який на основі адаптивного регулювання кількості категорій доступу підвищує продуктивність безпроводної мережі на MAC-підрівні;

7) програмну реалізацію розроблених і вдосконалених методів доступу до фізичного середовища на MAC-підрівні безпроводних комп'ютерних мереж.

**Об'єктом дослідження** є процеси управління доступом до фізичного середовища в безпроводних комп'ютерних мережах.

**Предметом дослідження** є моделі та методи управління доступом до фізичного середовища в безпроводних комп'ютерних мережах.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених в дисертаційній роботі завдань використано: теорію та методи управління в комп'ютерних мережах – для аналізу безпроводних мереж, моделей та методів управління доступом до фізичного середовища; методи системного аналізу, об'єктно-орієнтоване проектування – для розроблення імітаційної моделі; імітаційне моделювання та статистичні методи обробки даних – для розробки та реалізації вдосконалених методів управління доступом до фізичного середовища безпроводних комп'ютерних мереж.



**Наукова новизна одержаних результатів.** Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у тому, що:

*вперше:*

- розроблено метод адаптивного управління доступом до фізичного середовища, що ґрунтується на зборі та статистичній обробці даних попередніх передач та забезпечує оцінку зміни біжучої завантаженості в реальному часі;

- розроблено модель аналізу режимів доступу до фізичного середовища, яка за рахунок зміни параметрів мережі забезпечує оцінювання та вибір методу доступу з підвищеною пропускну здатністю для конкретного стану мережі;

- розроблено метод підвищення ефективності роботи безпроводної мережі за рахунок вибору числа категорій доступу в залежності від біжучої завантаженості мережі;

*вдосконалено:*

- метод розподіленого доступу до фізичного середовища з пріоритетним обслуговуванням за рахунок адаптивного регулювання кількості категорій доступу;

- модель вхідного трафіку в мережі, яка за рахунок врахування розподілу завантаженості мережі між станціями та інтенсивності вхідного потоку кадрів кожної станції забезпечує відтворення потоків трафіку для різних режимів роботи мережі.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розв'язання сформульованих задач є основою побудови адаптивних методів управління доступом до фізичного середовища з урахуванням біжучої завантаженості мережі та числа категорій доступу.

Розроблений метод підвищення ефективності роботи безпроводної мережі за рахунок вибору числа категорій доступу в залежності від біжучої завантаженості мережі дозволяє підвищити загальну пропускну здатність

для мереж середнього та великого розміру відповідно на 20 та 46%, знизити часові затримки відповідно на 30 та 40% і інтенсивність колізій відповідно на 26 та 48%.

Результати досліджень використані в Інституті теоретичної та прикладної інформатики Польської академії наук в рамках наукових робіт гранту NCN 4796/B/T02/2011/40 “Modele dynamiki transmisji, sterowania zatloczeniem i jakoscia uslug w Internecie” (акт впровадження від 01.07.2014 р.) та в ТзОВ “Українські промислові телекомунікації” (акт впровадження від 11.05.2016 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: в [108] – аналіз впливу пульсуючого трафіку на продуктивність роботи безпроводної мережі; в [101] – аналіз пропускних здатностей безпроводної мережі з різним числом категорій доступу; в [80, 105, 106, 107] – вдосконалення методу доступу з пріоритетним обслуговуванням за допомогою адаптивного регулювання числа категорій доступу та аналіз роботи безпроводної мережі з застосуванням запропонованого адаптивного алгоритму; [79] – аналіз результатів дослідження пропускних здатностей схем доступу DCF та EDCA; в [104] – аналіз впливу різного співвідношення різнопріоритетного трафіку на продуктивність роботи безпроводної мережі; в [78] – розширення стандартного методу доступу CSMA/CA з метою покращення роботи безпроводної мережі; в [76, 89, 90, 91, 92, 93] – системний аналіз архітектури імітаційної моделі та дослідження пріоритетного доступу до фізичного середовища.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати наукових досліджень були представлені на 7-и міжнародних науково-технічних конференціях: 10-th International Modeling School of AMSE-UAPL, 12-17 September 2005, Alushta-Ukraine; 11-th International Modeling School of

AMSE-UAPL, 12-17 September 2006, Alushta-Ukraine; 17-th International Modeling School of AMSE-UAPL, 05-10 September 2012, Alushta-Ukraine; 20-th International Conference, CN 2013, 17-21 June 2013, Lwowek Slaski, Poland; XI Міжнародна наукова конференція “Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту” (ISDMCI’2015), 25-28 травня, 2015, Залізний порт, Україна; 7-а Українсько-польська науково-практична конференція “Електроніка та Інформаційні Технології” (ЕЛІТ-2015), 27-30 серпня 2015, Львів, Чинадієво, Україна; 8-th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS’2015), September 24-26, 2015, Warsaw, Poland.

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 15 наукових праць, в тому числі 9 у наукових фахових виданнях рекомендованих ДАК України, 1 стаття та 2 матеріали конференцій у закордонних наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз. Одна наукова праця виконана одноосібно.

## **Розділ 1**

### **Аналіз безпроводних комп'ютерних мереж, моделей та методів доступу до фізичного середовища**

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 безпроводних мереж. Проведено порівняльний аналіз найбільш доступних методів дослідження роботи мережі: аналітичне та імітаційне моделювання.

#### **1.1. Режими роботи безпроводних 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 безпроводної мережі.

На MAC-підрівні визначаються два основних режими роботи безпроводних мереж – Ad Hoc та Infrastructure Mode [5, 8].

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 безпроводним 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 безпроводній 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.

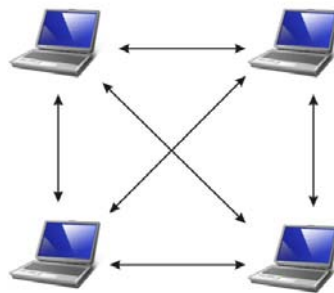


Рисунок 1.1 – Режим функціонування Ad Hoc

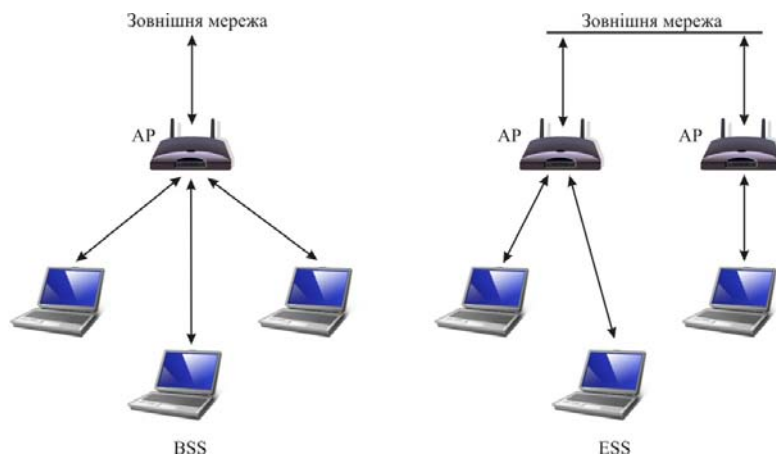


Рисунок 1.2 – Режим функціонування Infrastructure Mode

Окрім двох різних режимів функціонування безпроводних мереж на MAC-підрівні визначено правила колективного доступу до середовища передачі даних [5]. Необхідність існування таких регламентуючих правил цілком очевидна. Уявімо собі ситуацію, коли кожен вузол безпроводної 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 безпроводних мереж IEEE 802.11 часто порівнюють зі стандартом провідних 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 провідних та безпроводних 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 безпроводному 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 безпроводне середовище сильно відрізняється від провідного, тому необхідно враховувати такі його особливості [8]:

- безпроводне середовище схильне до помилок, тому для безпроводних мереж важливі малий час очікування та наявність механізму виправлення помилок;
- в безпроводному 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 безпроводні 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 безпроводного обладнання підтримує її в своїх продуктах.

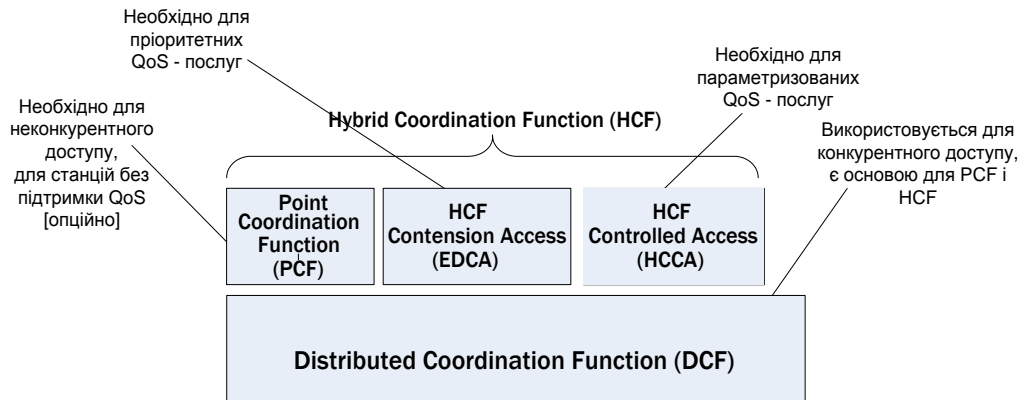


Рисунок 1.3 – Архітектура MAC-підрівня

### 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 рівноймовірно вибирається з інтервалу  $(0, W - 1)$ , де  $W$  – вікно конкуренції, вимірюється у слотах часу довжиною  $\sigma$  та залежить від кількості  $i$  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.

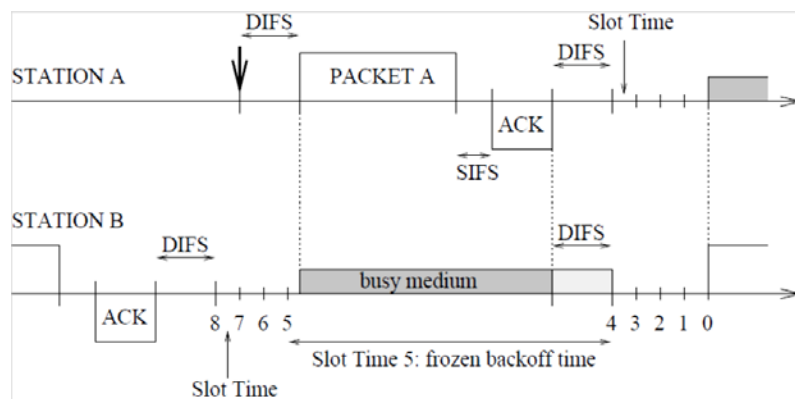


Рисунок 1.4 – Приклад роботи базового механізму доступу

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 проблеми “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.

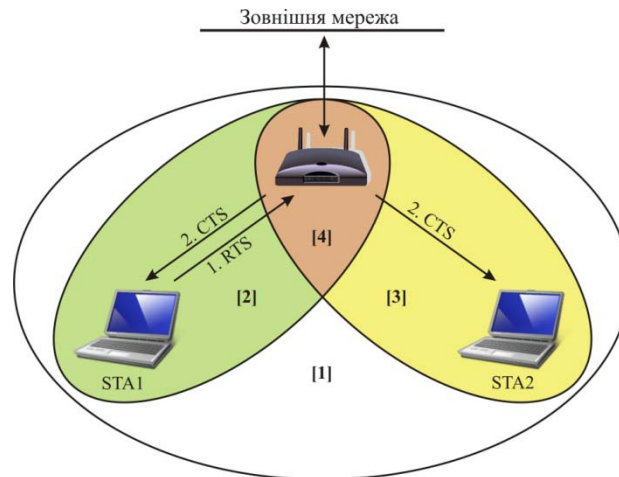


Рисунок 1.5 – Проблема прихованого вузла. 1 – зона базового обслуговування; 2 – зона роботи станції 1; 3 – зона роботи станції 2; 4 – зона можливого виникнення завад при одночасній передачі станцією 1 та станцією 2.

### 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, безпроводні 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  $i$ , відповідно, тим довше середовище буде зайнятим.

В більшості досліджень, спрямованих на розв'язок цих проблем, за основу взято поділ трафіку за пріоритетом [9, 10, 11]. Як наслідок, спершу в стандарті 802.11e, а далі і в стандарті 802.11n введено гібридну схему управління (Hybrid Coordination Function, HCF) [5] (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) [5].

Таблиця 1.1.

#### Перетворення класів трафіку 802.1D та категорій доступу

Пріоритет	802.1D користувачський пріоритет	802.1D тип трафіку	Категорія доступу
Найнижчий	1	ВК (фон)	AC_ВК (фон)
	2	–	
	0	ВЕ (найкращі зусилля)	AC_ВЕ (найкращі зусилля)
	3	ЕЕ (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 [12], 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 [5].

Таблиця 1.2.

Параметри MAC-підрівня для категорій доступу

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

Стандарт 802.11n регламентує блокову передачу (Block ACK) та обов'язкову агрегацію кадрів [13, 14, 15], оскільки значна частина

пропускної спроможності йде на передачу службових заголовків та кадрів підтвердження прийому АСК.

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 АСК. 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 (АСК), 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.

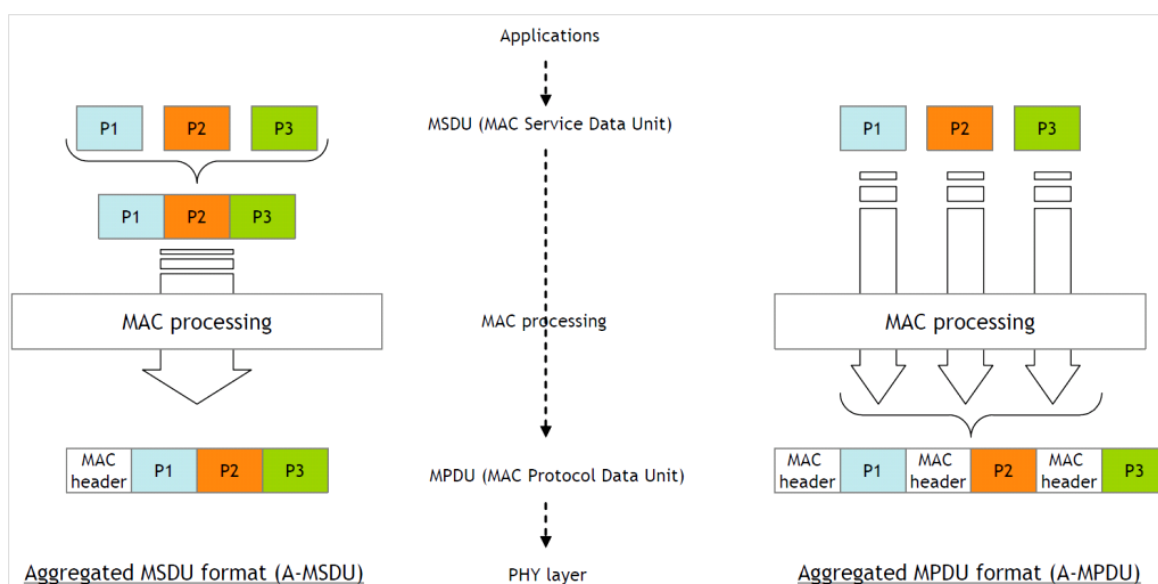


Рисунок 1.6 – Об'єднання кадрів на MAC-підрівні

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 [16]. Хоча протокол Block ACK було передбачено ще в стандарті 802.11e, він не отримав широкого застосування [17]. 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 [4]. Більше того, запит підтвердження (окремий кадр BAR – BA Request) може не використовуватися, замість цього достатньо задати певний тип політики підтверджень.

### **1.3. Методи підвищення ефективності роботи MAC-підрівня безпроводних мереж**

За останні десятиліття-два безпроводний зв'язок набув стрімкого розвитку. Швидкість передачі сигналів за цей час зросла в сотні разів. Тим не менше, реальна пропускна здатність безпроводних мереж, вимірювана на каналному рівні, значно нижча [3, 4].

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 [6, 7]. 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 [3].

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 безпроводній мережі. Розробники IEEE 802.11n підвищують ефективність протоколу MAC-підрівня за допомогою агрегування кадрів [8], 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 [18] 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 безпроводного 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 [19]. Високопріоритетні кадри (голос та кадри управління) невеликого розміру (80-256 байт) [20], в результаті агрегований A-MSDU кадр теж невеликого розміру, що призводить до неефективного використання каналу [19]. Збільшити ефективність використання каналу можна, ввівши додаткові затримки перед отриманням доступу до середовища та накопичивши кадри для передачі – метод DCA (Delayed Channel Access) [21]. Згідно DCA, доступ до середовища відкладається доти, доки в черзі не назбирається визначене число  $\sigma$  кадрів, чи не мине очікувальний часовий

проміжок  $\tau$  з моменту надходження до черги першого кадру, чи доки час з моменту надходження в чергу останнього кадру менше часу  $\lambda$ , необхідного для доступу до середовища. Пізніше в DCA було додано динамічну зміну параметру  $\sigma$  в залежності від розміру черги та інтенсивності надходження кадрів до черги [22]. Також була запропонована функція [23], яка в залежності від пріоритету кадру та значення параметру  $\lambda$  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 [20]. Зовсім інший підхід до оптимізації процесу агрегації запропоновано у [24], 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 [4], можна відзначити, що найбільш вагомий вплив на верхню межу пропускну здатності має довжина слоту часу SlotTime (рисунок 1.7). 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. Так у [25] 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.

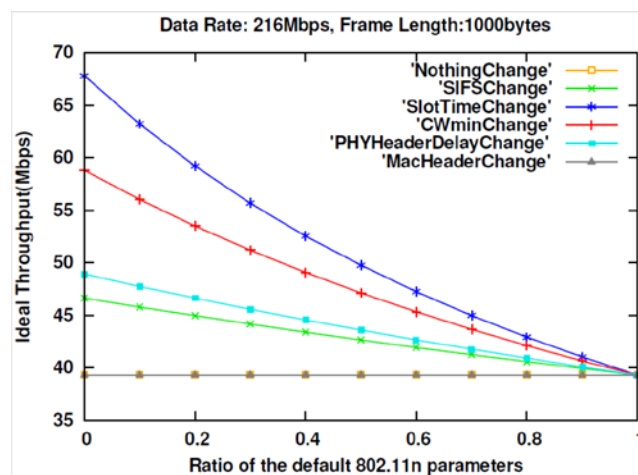


Рисунок 1.7 – Ідеальна пропускна здатність при зміні одного з параметрів MAC/PHY рівнів

Найбільші затримки при передачі кадрів вносить алгоритм вирішення конфліктів, а саме – мінімальне вікно конкуренції (рисунок 1.7), тому багато робіт присвячено підвищенню пропускної здатності та зменшенню затримок передачі кадрів за рахунок поліпшення алгоритму вирішення конфліктів. Алгоритми динамічної зміни мінімального вікна конкуренції запропоновано у [26, 27, 28] для схеми доступу DCF та у [29, 30, 31] для схеми доступу EDCA. Для визначення оптимального значення  $CW$  пропонують враховувати число повторних спроб передачі [26, 28, 29, 31], число активних станцій [26, 27, 28, 31], відстань до точки доступу [27], діапазон

значень вікна конкуренції [27], число відправлених кадрів [29], клас доступу [29, 31], різницю поточного значення  $CW$  з мінімальним  $CW_{\min}$  та максимальним  $CW_{\max}$  значеннями [30]. При цьому усі алгоритми визначення оптимального значення вікна конкуренції збільшують ефективність роботи мережі лише за умови її насиченості, в іншому випадку можуть навіть погіршувати роботу мережі [32].

Іншим підходом до покращення алгоритму вирішення конфліктів є заміна експоненційного збільшення вікна конкуренції на лінійне [33, 34] або застосування різних коефіцієнтів збільшення [30, 35]. Ще більш радикальні зміни запропоновано у [36], де  $CW$  може приймати лише три значення: 31, 63, 127. При цьому вводиться додатковий лічильник  $TURN$ , який залежить від  $CW$  та може приймати значення 3, 2, 1, відповідно. Лічильник  $TURN$  вмикається в момент, коли лічильник зворотного відліку рівний нулю. Якщо протягом відліку  $TURN$  середовище залишається вільним, то станція розпочинає передачу кадру. Такий алгоритм дозволяє уникнути колізій між кадрами, для яких одночасно закінчився відлік backoff, та надає перевагу в передачі кадру, який попадав у більшу кількість колізій.

Крім мінімального вікна конкуренції на затримки в мережі впливають і інші часові MAC-параметри – проміжки AIFS та TXOP. Саме вибору довжини безконкурентного інтервалу TXOP присвячено роботу [37]. Для визначення довжини TXOP береться до уваги довжина черги та розмір наступного кадру класу AC. У [38] крім TXOP динамічно налаштовуються AIFS та  $CW_{\min}$ . Оптимальні значення MAC-параметрів обчислюються на основі інформації про число активних вхідних і вихідних потоків та мінімально необхідної швидкості для їх передачі в залежності від класу потоку. При цьому для станцій та точок доступу обчислені оптимальні значення MAC-параметрів будуть різні. Оскільки точка доступу повинна передати увесь трафік, який надходить до станцій, вона змушена значно частіше отримувати доступ до середовища, ніж станції. Тому алгоритмом

[38] передбачено, що для кожного класу доступу АС точки доступу обчислені оптимальні значення МАС-параметрів будуть на рівень менші, ніж для аналогічного класу доступу станції.

#### **1.4. Моделювання безпроводних мереж на МАС-підрівні**

Дослідження роботи безпроводної мережі на фізичній моделі потребує великих зусиль, часових та матеріальних витрат, крім того, воно дозволяє розв'язувати окремі задачі при заданні невеликої кількості поєднань досліджуваних параметрів мережі. Тому використання фізичної моделі мережі при дослідженнях є недоцільним, і значно ефективнішим є використання абстрактного моделювання.

На сьогодні широко застосовують аналітичне та імітаційне моделювання [39, 40].

Аналітичне моделювання дозволяє отримувати розв'язок, формуючи математичні закони та рівняння, які пов'язують об'єкти мережі. До переваг аналітичного моделювання можна віднести великий ступінь узагальнення, багаторазовість використання, проте найбільш повне дослідження роботи функціонування мережі можна провести, якщо відомі явні залежності, які пов'язують шукані характеристики з початковими умовами, параметрами та змінними системи. Проте такі залежності вдається отримати для доволі простих мереж. Щоб використовувати аналітичне моделювання слід суттєво спростити первісну модель мережі, щоб мати можливість вивчити загальні властивості мережі.

Більш складні задачі можна розв'язувати за допомогою імітаційного моделювання. Імітаційні моделі дозволяють достатньо просто враховувати випадкові процеси впливу та інші фактори, які створюють труднощі при аналітичному моделюванні. Імітаційна модель крок за кроком відтворює події та процеси, які відбуваються в реальній мережі. До переваг імітаційного моделювання можна віднести можливість опису елементів та

процесів мережі на високому рівні деталізації; можливість дослідження динаміки взаємодії елементів та процесів мережі в часі та просторі параметрів системи; можливість підміни процесу зміни подій в досліджуваній мережі, яка працює в реальному масштабі часу, на прискорений процес зміни подій в темпі роботи програми, що значно скорочує часові витрати на дослідження.

#### 1.4.1. Аналітичне моделювання

##### *Базова схема доступу DCF*

Безліч різних аналітичних моделей було розроблено в останні роки для оцінки роботи MAC-підрівня безпроводних мереж стандарту 802.11 з метою його вдосконалення. Найбільш популярною серед аналітичних моделей стала так звана модель Бьянкі [41, 42], в якій було поєднано backoff-процес зворотного відліку стандарту 802.11 та двовимірний марківський ланцюг. На відміну від багатьох робіт, зокрема [43], де backoff-процес зворотного відліку був геометрично розподілений, в моделі Бьянкі backoff-процес є експоненційним. При побудові аналітичної моделі Бьянкі було прийнято ряд припущень про ідеальність стану каналу та визначену кількість станцій, які завжди мають в черзі кадри для передачі. Ймовірність виникнення колізії при передачі кадру є незалежною та однаковою і не залежить від кількості попередніх повторних передач. В даній моделі пропускна здатність є насиченою, тобто завантаженість мережі є максимально можливою, при якій мережа ще є стабільною. Припущення про насиченість пропускної здатності значно спрощує розробку аналітичної моделі, оскільки зникає необхідність опису вхідного потоку кадрів.

Згідно механізму DCF, після інтервалу DIFS станція, яка слухає середовище, зменшить лічильник відтермінування лише після того, як мине наступний вільний слот. Отже, лише станція, яка успішно передала кадр, може отримати доступ до першого слоту після DIFS, згенерувавши проміжок відтермінування рівним нулю для нового кадру. Більше того, в

такому випадку виключається колізія кадру. Цей нюанс було виявлено в роботах [44] та [45].

На відміну від двовимірної марківської моделі Бьянкі в [46] використали одновимірний марківський ланцюг, де процес зворотного відліку станції представлено набором backoff-періодів, кожен з яких є дискретним та рівномірно розподіленим.

Класичною моделлю трафіку в інформаційних мережах є пуассонівський потік [39, 40], оскільки реальний трафік мережі зазвичай має змінну завантаженість, а не насичену. Пуассонівський потік характеризується набором ймовірностей  $P(k)$  надходження  $k$  повідомлень за часовий проміжок  $t$ :

$$P(k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda t} \quad (1.1)$$

де  $k = 0, 1, \dots$  – число повідомлень,  $\lambda$  – інтенсивність потоку (число повідомлень за секунду).

Основною властивістю пуассонівського потоку, завдяки якій його широко застосовують при моделюванні, є його адитивність – результуючий потік суми пуассонівських потоків також є пуассонівським з сумарною інтенсивністю:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum \lambda. \quad (1.2)$$

Розглянемо різні підходи для побудови аналітичної моделі, де потік трафіку є пуассонівським, коли черги станцій можуть бути пусті.

Так, в роботах [47, 48, 49, 50, 51] за основу було взято модель Бьянкі [42]. Для опису змінної завантаженості в роботах було прийнято припущення, що в чергу кожної станції надходять кадри з постійною ймовірністю та з однаковою інтенсивністю  $\lambda$  пуассонівського потоку. В [48] та [49] до базової марківської моделі додано стан, який описує пусту чергу станції.

Крім того, в моделях [49, 50, 51] було враховано ефект прихованого вузла, тобто в моделі враховано ймовірність передачі прихованим вузлом в так званий вразливий проміжок – проміжок між попередньою передачею і виявленням поточної передачі в каналі (рисунок 1.8).

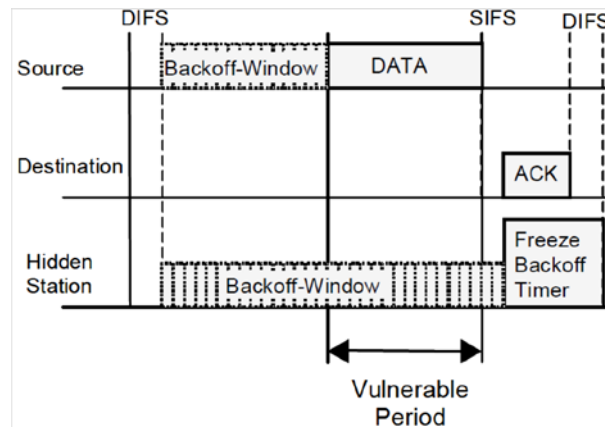


Рисунок 1.8 – Вразливий проміжок для прихованих станцій при базовому механізмі доступу

Інший підхід для побудови аналітичної моделі, але теж на основі двовимірної марківської моделі, було використано в [52]. Для аналізу мережі з ненасиченою завантаженістю, яка функціонує за базовим механізмом доступу до середовища, автори досліджують поведінку станції у фіксованих моментах часу трьох типів (рисунок 1.9):

- Тип 1: закінчення періоду часу, протягом якого канал був зайнятий передачею кадру незалежно від того, чи була вона успішною, чи ні, якщо після неї черга станції пуста;
- Тип 2: DIFS після періоду часу, коли канал був зайнятий передачею кадру незалежно від того, чи була вона успішною, чи ні;
- Тип 3: кожен слот часу після моменту часу типу 2 доки канал знову не буде зайнятим.

Далі для кожного моменту часу будується двовимірна марківська модель зворотного backoff-відліку, за допомогою якої оцінюється робота мережі.

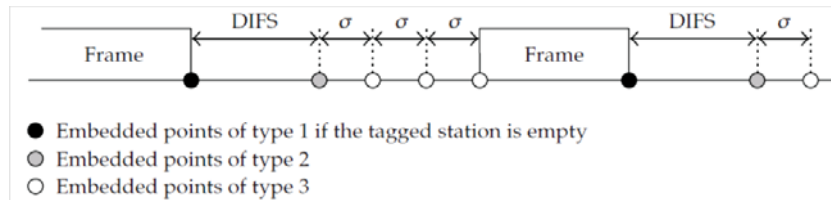


Рисунок 1.9 – Фіксовані моменти часу

Припущення про те, що інтенсивність надходження кадрів до черги для всіх станцій однакова не зовсім коректне для реальної мережі. Тому у [53] запропонували модель, де усі станції поділені на два типи з інтенсивностями потоку кадрів  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  відповідно. Для кожного моменту часу побудовано тривимірну марківську модель станів, яка описує число станцій кожного типу та тип станції, яка обслуговується в даний момент часу.

За допомогою вищезгаданих аналітичних моделей можна оцінити пропускну здатність мережі, ймовірності колізій та затримки передачі кадрів. Поведінку кадрів у черзі, а саме – тривалість перебування в черзі, довжина черги, за умови змінної завантаженості мережі, а відповідно й вхідного потоку кадрів до черги станції, різної довжини кадрів, затримок, спричинених колізіями між станціями, алгоритмом зворотного відліку, зайнятістю каналу передачею кадру іншою станцією, досліджено у роботі [54].

Вищеописані роботи проводились за припущення ідеального каналу передачі, проте нехтування завадами зазвичай призводить до суттєвих завищень оцінок пропускну здатності, оскільки в сучасних умовах міста електромагнітні завади – неминучий фактор, який погіршує пропускну здатність мережі через спотворення кадрів. Першим кроком в напрямку врахування завад в аналітичних моделях була робота [55]. Дані дослідження були продовжені в [40] в напрямку оцінки ефективності застосування фрагментації кадрів, рекомендованої стандартом IEEE 802.11 для мережі, яка працює за умови завад.

### *Схема доступу EDCA*

Специфікація 802.11e є розширенням основного стандарту безпроводних мереж та поділяє трафік на класи з різними параметрами якості обслуговування QoS. Конкурентний доступ до середовища регламентується схемою EDCA.

Забезпечення підтримки якості обслуговування досягається шляхом поділу трафіку на класи доступу. Для кожного класу визначено свій пріоритет та набір параметрів, які регулюють доступ до середовища: захисний проміжок AIFS, мінімальне та максимальне значення конкурентного вікна  $CW_{\min}$  та  $CW_{\max}$  відповідно, граничне значення вільного від конкуренції проміжку часу TXOP. Тому при розробці аналітичної моделі безпроводної мережі з підтримкою якості обслуговування є надзвичайно важливим врахування усіх особливостей схеми доступу EDCA.

Розробці аналітичної моделі безпроводної мережі зі схемою доступу EDCA присвячено багато робіт [6, 35, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65], які в свою чергу здебільшого є розширенням аналітичної моделі Бьянкі [42] базової схеми доступу DCF.

Розглянемо моделі, де пропускна здатність є насиченою, тобто в черзі станції завжди знаходяться кадри для передачі. В цьому випадку вхідний потік не описується, що спрощує розробку аналітичної моделі.

В роботах [57, 58] автори реалізували поділ трафіку на класи. Проте в [58] станція може мати трафік лише одного класу, тобто механізм вирішення внутрішніх колізій не враховано, що призводить до отримання завищених оцінок пропускної здатності та часових затримок для класів доступу з нижчим пріоритетом. Також, пріоритетність доступу до середовища регулюється лише розміром мінімального вікна конкуренції  $CW_{\min}$ , решта параметрів ( $CW_{\max}$ , AIFS, TXOP) є ідентичними для кожного класу доступу.

На відміну від [58] в аналітичній моделі [57] враховано механізм розв'язку внутрішніх колізій між кадрами різних класів доступу. Автори,



базуючись на [42], запропонували модель з розв'язками для безпровідної мережі, яка містить одну, дві чи три активні станції. Таке обмеження щодо кількості активних станції зумовлено необхідністю розв'язку рівняння степеня  $n$ , де  $n$  – число активних станцій в мережі. Згідно теореми Абеля-Руффіні [66], рівняння степеня  $n$  при  $n \geq 5$  нерозв'язне у радикалах, тобто розв'язок не має закритої форми. Проте розв'язок такого рівняння можна отримати чисельними методами.

Аналітична модель для мережі, яка містить одну активну станцію, може бути використана для дослідження домінуючого висхідного трафіку точки доступу, коли станції не передають, а лише підтверджують прийом кадрів від точки доступу. Такий сценарій поведінки мережі було використано авторами у роботі [61].

Можливості схеми блокового підтвердження (Block ACK) реалізовано у роботі [6]. До аналітичної моделі автори додали ймовірність появи завад в середовищі, за основу взято модель гаусівського шуму.

В роботах [6, 57, 58, 61] здебільшого враховують лише деякі параметри схеми доступу EDCA, найбільш повними в цьому сенсі є роботи [35, 56, 65], які описують схему доступу EDCA з урахуванням параметрів AIFS,  $CW_{\min}$ ,  $CW_{\max}$ , TXOP. В аналітичній моделі [35] подібно до [58] станція передає трафік лише одного класу, таким чином, автори, задля спрощення моделі, не розглядають механізм вирішення внутрішніх колізій між кадрами різних класів. В [56] цей механізм враховано, проте і в цій моделі є свої обмеження – станція може мати трафік лише двох класів доступу, при цьому в моделі знехтувано ймовірністю переповнення черги та, відповідно, втрати кадрів, таким чином черги є нескінченно довгими, що не відповідає реальності. Аналітична модель [65] об'єднала в собі можливості як відтворення роботи мережі, де станції передають трафік лише одного класу, так і більш наближену до реальності роботу мережі, де в черги станції надходить трафік різних класів.

В насиченому режимі станції працюють досить рідко, оскільки реальний трафік зазвичай має змінну завантаженість. Враховуючи поділ трафіку на класи, ймовірність насиченості усіх чотирьох черг на MAC-підрівні є дуже малою. В роботах [59, 60, 62, 63, 64] врахували змінність вхідного потоку станцій та розробили аналітичні моделі для дослідження схеми доступу EDCA.

Аналітичну модель безпроводної мережі зі змінною завантаженістю, яка працює згідно схеми доступу EDCA, запропоновано у моделі Енгельштада (за прізвищем першого автора) [60, 62]. Для того, аби врахувати AIFS-диференціацію між кадрами різних класів, автори ввели поняття додаткових слотів часу:

$$A_i = AIFS[i] - \min(AIFS[i]) \geq 0, i = 0, \dots, N - 1 \quad (1.3)$$

де  $N$  – кількість класів доступу AC (зазвичай чотири),  $AIFS[i]$  – величина проміжку AIFS у слотах для  $i$ -го класу доступу. Також було прийнято припущення, що додаткові слоти  $A_i$  рівномірно розподілені серед усіх слотів часу. Тоді як в реальності слот  $A_i$  з'являється одразу після іншого слоту  $A_i$  або після успішної чи неуспішної передачі кадру. В результаті такого припущення, як відзначили самі автори [60], аналітична модель має суттєві розбіжності з імітаційним моделюванням при помірній завантаженості мережі (рисунки 1.10, 1.11). При чому для класу доступу AC[3] пропускна здатність вища, ніж вхідний потік (рисунок 1.11), що, очевидно, некоректно.

Автори [63, 64] доповнили модель Енгельштада [60] для дослідження часових затримок.

Ще один механізм забезпечення якості обслуговування ТХОР реалізовано в моделі [59]. За допомогою розробленої моделі автори показали, що механізм ТХОР може збільшити пропускну здатність мережі та зменшити кінцевий час передачі кадру при помірній та високій завантаженостях мережі.

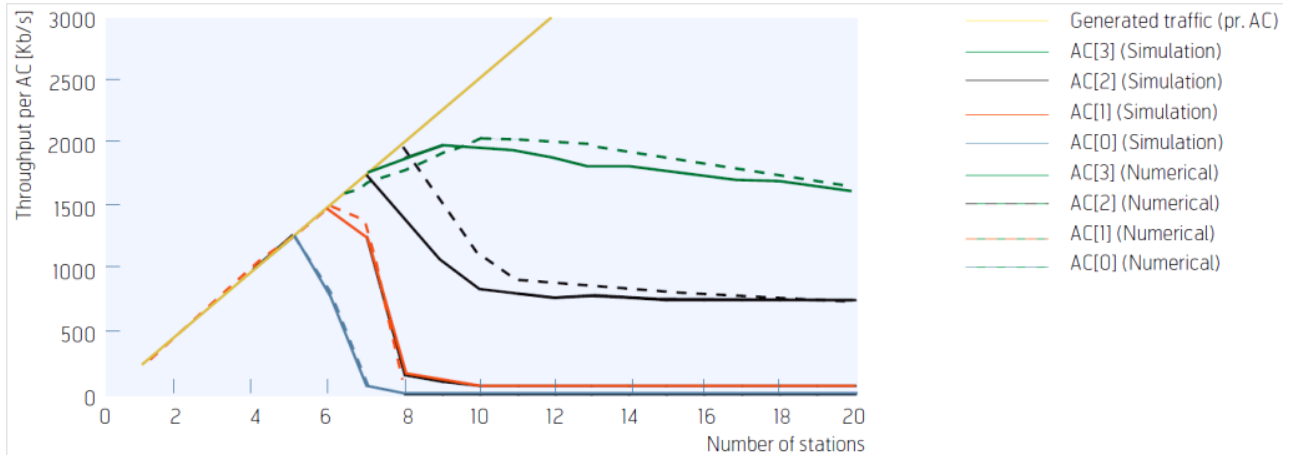


Рисунок 1.10 – Залежність пропускної здатності від кількості станцій в аналітичній та імітаційній моделях Енгельштада при чотирьох класах доступу для кожної станції та при вхідному потокові для кожного класу доступу – 250 Кбіт/с

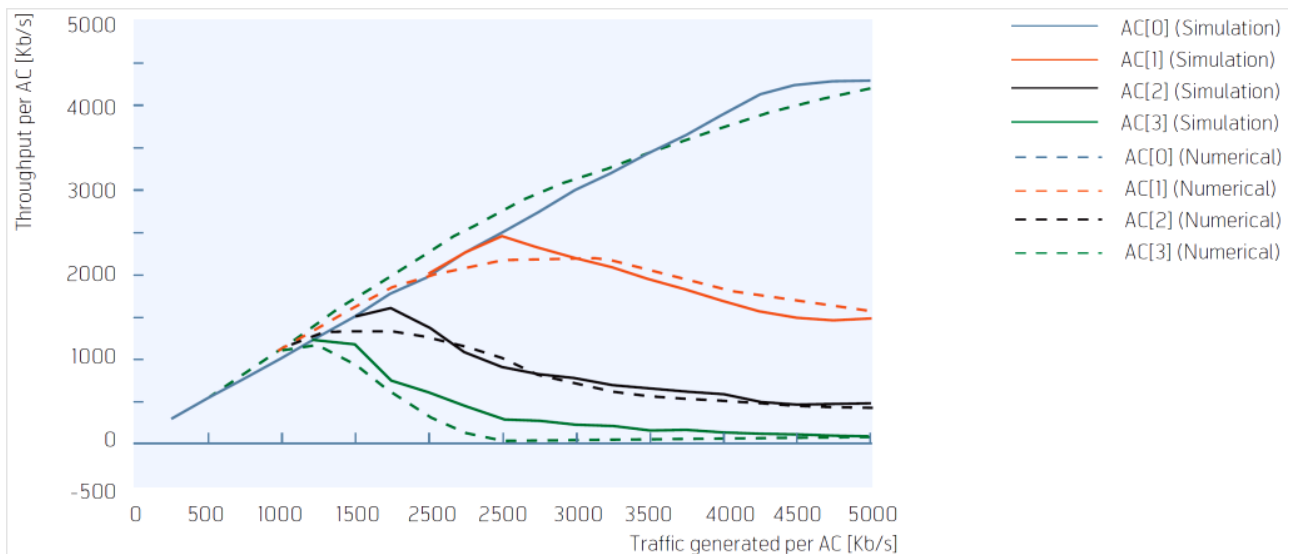


Рисунок 1.11 – Залежність пропускної здатності від вхідної завантаженості станції для аналітичної та імітаційної моделей Енгельштада

#### 1.4.2. Імітаційне моделювання

На сьогодні існує досить багато комерційних та вільно доступних симуляторів безпроводних мереж. Усі вони мають свої переваги та недоліки, області застосування та популярність серед інженерів та науковців.

Серед безкоштовних симуляторів безпроводних мереж найбільш популярні J-Sim [67], OMNeT++ [68], NS-2 [69] та ShoX [70].

J-Sim (JavaSim) – імітаційна модель мережі написана на мові програмування Java. Модель є компонентно-орієнтованою, де будь-які об'єкти є компонентами: станція, з'єднання, протокол. При цьому кожен компонент може бути цілісним або складатись з інших компонентів. З'єднання між компонентами відбувається за допомогою портів. Існує три типи з'єднань портів: один до одного, один до багатьох та багато до багатьох. До моделі можна додавати власні компоненти, використовуючи вже існуючі компоненти як підкласи, чи перевизначаючи їх атрибути та методи.

J-Sim працює як мережа з комутацією пакетів. Сама мережа описується узагальненою структурою станцій та узагальненими мережевими компонентами. Станції взаємодіють між собою за дворівневою моделлю. Нижчий рівень (Core Service Layer, CSL) об'єднує в собі рівні від мережевого до фізичного моделі OSI, решта рівнів моделі OSI об'єднано у так званий вищий рівень. Для моделювання безпроводної мережі в J-Sim запропоновано спеціальне розширення Wireless Extention, в якому реалізовано MAC-підрівень стандарту 802.11.

J-Sim використовує мову сценаріїв Tcl для налаштування параметрів роботи мережі для моделювання. Конфігураційні Tcl-файли можна створювати у графічному редакторі gEditor. Також в моделі передбачено спеціальну компоненту для перегляду статистичних результатів моделювання, проте відсутня можливість візуалізації роботи мережі під час моделювання. З іншого боку, роботу мережі можна візуалізувати за допомогою мережевого аніматора nam (Network animator) імітаційної моделі NS-2, згенерувавши файл трасування визначеного формату. Варто зауважити, що J-Sim є детерміністичною моделлю, тобто результати є однаковими, незалежно від кількості перезапуску моделювання.

J-Sim працює на будь-якій операційній системі, на якій встановлено Java SDK.

OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++) є імітаційною моделлю дискретних подій та написана за допомогою мови програмування C++. Так само як і у J-Sim архітектура моделі є компонентно-орієнтованою, модульною та розширюваною. Базовою одиницею в OMNeT++ є модуль. Модуль може складатись з інших модулів або бути цілісним. Лише цілісним модулям можна задавати характер функціонування. Модулі обмінюються між собою повідомленнями через шлюзи за допомогою зв'язків. Зв'язок відповідає за затримку поширення сигналу, частоту появи завад та швидкість передачі даних. На відміну від J-Sim в OMNeT++ модулі з'єднуються лише за типом один до одного.

Для моделювання безпроводних мереж для OMNeT++ створено окремі зовнішні розширення, серед яких найбільш відомі INET Framework та Mobility Framework.

Крім найбільш важливих рівнів моделі OSI в OMNeT/IF реалізовано два модулі: інформаційна область та мобільність. Інформаційна область використовується для спільного використання міжрівневих даних, а модуль мобільності відповідальний за забезпечення та поновлення поточного стану станцій та управління комунікаційними зв'язками. MAC та PHY рівні об'єднані в єдиному модулі NIC (Network interface card). Фізичний рівень, в свою чергу, складається з двох модулів, один з них визначає характеристики сигналу, інший відповідальний за прийняття рішення, чи буде направлено кадр на вищий рівень.

За допомогою мови NED (Network Description) можна зв'язувати окремі компоненти у більші компоненти та модулі. Також імітаційна модель має графічний мережевий редактор GNED (Graphical Network Editor), NED-компілятор, графічний інтерфейс (Tkenv) та командний рядок (Cmdenv) для виконання моделювання, а також графічні засоби для аналізу результатів

моделювання (Plove, Scalars). OMNeT++ – одна з небагатьох імітаційних моделей, яка дозволяє переглядати результати під час процесу моделювання. При цьому користувач може призупинити роботу моделі, переглянути інформацію, яка його цікавить, та, навіть, внести зміни в роботу моделі та продовжити моделювання.

OMNeT++ працює під операційними системами Linux/Unix та Windows.

Найбільш популярною імітаційною моделлю серед науковців є NS-2, яка написана за допомогою двох мов програмування: C++ для самої об'єктно-орієнтованої імітаційної моделі та OTcl (об'єктно-орієнтоване розширення мови Tcl) для інтерпретатора сценаріїв роботи мережі.

В NS-2 запропоновано урізану модель OSI без рівня представлення та сеансового рівня. Реалізовано досить багато готових протоколів та сценаріїв для моделювання безпроводних мереж. Структура моделі є досить складною, що ускладнює додавання нових компонентів, оскільки вимагає ґрунтовних знань будови моделі. Скомпонувавши сценарій моделювання на OTcl, слід зв'язати його з відповідними C++ класами, створивши відповідні OTcl класи для кожного C++ класу. Також досить складно візуалізувати роботу моделі. Спершу за допомогою двох скриптів слід згенерувати файли трасування та змін. Далі за допомогою OTcl-інтерпретатора та графічного аніматора `nam` візуалізується робота моделі. Для статистичного відображення результатів моделювання використовують зовнішні програми `gnuplot` або `xgraph`.

NS-2 працює на операційних системах UNIX, Free BSD та Windows.

ShoX є об'єктно-орієнтованою імітаційною моделлю, написаною за допомогою мови Java. Можливість моделювання безпроводних мереж була інтегрована одразу, на відміну від J-Sim, OMNeT++ та NS-2.

Архітектура моделі відповідає семирівневій моделі OSI, хоча за замовчуванням в ShoX присутні лише п'ять нижчих рівнів. Не зважаючи на це, усі рівні можна отримати з абстрактного суперкласу та визначати як

об'єкти LayerType. Тому можна досить легко додати необхідні рівні моделі OSI для кожного конкретного випадку моделювання. З абстрактного суперкласу, який визначає мінімальну функціональність та інтерфейс, отримують протоколи, моделі поширення сигналу та мобільності мережі. Різні об'єкти в ShoX зв'язуються між собою через подію. На додачу до абстрактних класів рівнів моделі OSI запропоновано спеціальний рівень – AirModule. На цьому рівні відбуваються усі події, пов'язані з каналом передачі (наприклад, інтерференція сигналів).

ShoX має графічну оболонку, що значно спрощує налаштування сценарію роботи мережі. Завдяки можливості візуалізації результатів моделювання та їх статистичної обробки, ShoX є досить потужною моделлю.

Аналогічно як і J-Sim, ShoX працює з усіма операційними системами, на яких встановлено Java SDK.

У роботах [71, 72, 73, 74, 75] показано, що імітаційної моделі, яка б охоплювала усі нюанси роботи безпроводної мережі, нема. Кожна з моделей має свої переваги та недоліки. J-Sim приваблює гнучкістю компонентно-орієнтованої архітектури, тоді як OMNeT++ володіє добре розробленою графічною оболонкою, яка спрощує роботу над розробкою власних протоколів роботи мережі. Для NS-2 розроблено багато готових моделей роботи мережі та існуючих мережевих протоколів. ShoX досить нова імітаційна модель, проте вона від самого початку розрахована на моделювання безпроводних мереж та має зручний графічний інтерфейс.

## 1.5. Висновки до розділу

1. Розглянуто та проаналізовано механізми доступу до середовища на MAC-підрівні стандарту безпроводних мереж IEEE 802.11. Найбільшого поширення отримали базовий механізм доступу (DCF) та механізм доступу з забезпеченням якості обслуговування (EDCA). Алгоритм

запобігання та вирішення колізій, який використовується в механізмі доступу до середовища, вносить суттєві затримки при передачі кадрів, що, в свою чергу, знижує пропускну здатність каналу.

2. Аналіз методів модифікації механізму доступу до середовища показує, що пропускну здатність безпроводної мережі можна покращити, а затримки передачі – оптимізувати.
3. Більшість методів модифікації механізму доступу до середовища дають незначне збільшення пропускну здатності мережі, часто при цьому погіршуючи часові характеристики передачі кадрів, оскільки вони не враховують динаміку зміни кількості станцій в мережі, її завантаженість, рівень завад в середовищі. Тому найефективнішими методами модифікації механізму доступу до середовища є ті, які адаптивно реагують на зміни в мережі.
4. Проведено порівняльний аналіз найбільш доступних методів дослідження роботи мережі: аналітичного та імітаційного моделювання. Аналітичне моделювання дає змогу лише приблизно оцінити параметри роботи мережі, оскільки описати математичні залежності шуканих характеристик з початковими умовами можна для спрощених моделей мережі. Якщо постає проблема оцінки параметрів більш складної мережі, то найефективніше використовувати для цього імітаційне моделювання, оскільки воно дозволяє описати елементи та процеси в мережі з високим рівнем деталізації. Крім цього, імітаційне моделювання дозволяє досліджувати роботу мережі в динаміці.
5. Серед існуючих доступних симуляторів мереж немає імітаційної моделі, яка б охоплювала усі нюанси роботи безпроводної мережі. Більшість з них позбавлена простого графічного інтерфейсу для зручності зміни параметрів функціонування мережі та дослідження динаміки роботи мережі. Крім того, від дослідника вимагається знання додаткових специфічних мов програмування.



Результати даного розділу опубліковані у роботах [76, 77, 78, 79, 80].

## **Розділ 2**

### **Розробка імітаційної моделі MAC-підрівня безпроводної 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 безпроводної мережі на MAC-підрівні. На основі концептуальної моделі, побудованої за допомогою діаграм UML (Unified Modeling Language), розроблено імітаційну модель MAC-підрівня безпроводної мережі. Наведено особливості функціонування імітаційної моделі, які наближають її роботу до реальних умов функціонування MAC-підрівня безпроводних 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 безпроводні мережі зазвичай мають складну, розгалужену структуру, де складовими є сегменти, побудовані за однією з базових топологій (п.1.1). 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 безпроводної мережі складається з деякого числа станцій з безпроводними мережевими адаптерами та точки доступу, яка виконує роль своєрідного концентратора та, за необхідності, забезпечує зв'язок між безпроводним сегментом та провідною мережею. При цьому окремий сегмент локальної безпроводної 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 організовувати зв'язок на великі відстані. Така мережа дієздатна при дальності до 200 м на відкритому просторі та близько 30-50 м в приміщеннях [81, 82, 83].

Крім того, можлива також повністю безпроводна організація мережі, коли зв'язок між окремими сегментами здійснюється по радіо- чи ІЧ-каналі за допомогою безпроводних 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 провідних чи безпроводних 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 безпроводна 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 безпроводної комп'ютерної мережі може бути розділена на задачі аналізу та проектування окремих її сегментів. Ці сегменти надалі можуть з'єднуватися за допомогою як провідних, так і безпроводних 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 безпроводних 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 безпроводних 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 безпроводної 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  $VoF$  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.

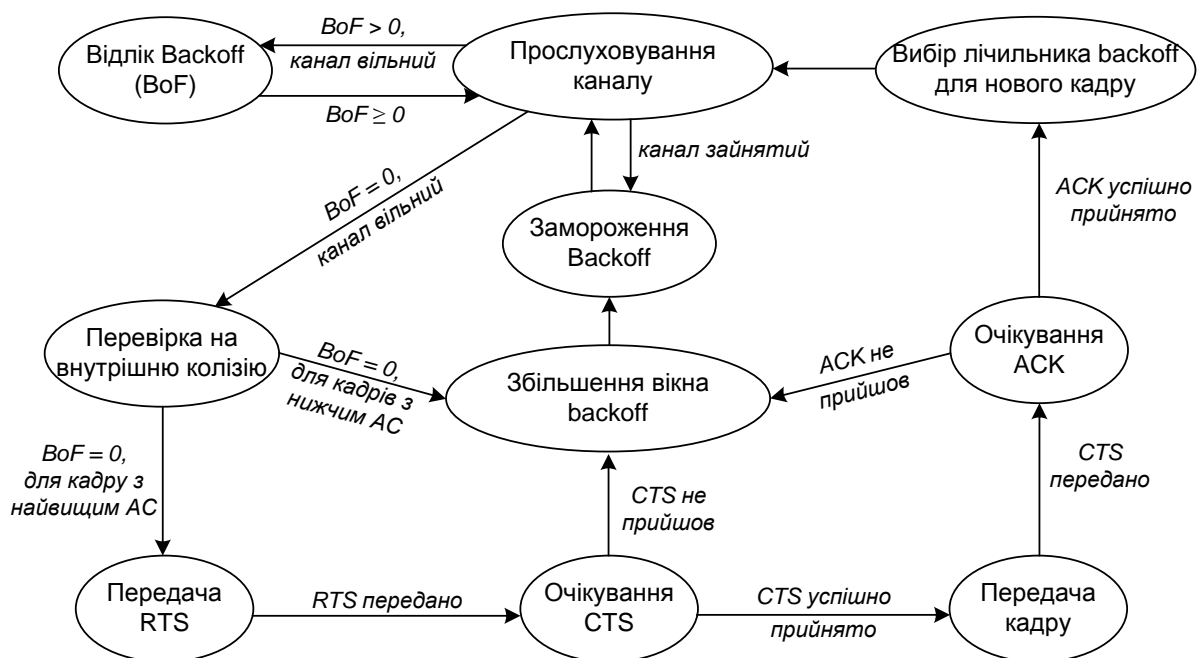


Рисунок 2.1 – Спрощена діаграма станів безпроводної станції на MAC-підрівні

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. Елементи моделі MAC-підрівня безпроводної мережі та їх взаємозв'язок

Як було зазначено вище, аналіз безпроводної мережі можна звести до аналізу її окремих сегментів, які в свою чергу складаються з набору робочих станцій, точки доступу та безпроводного середовища. Станції, точки доступу і безпроводне середовище описуються своїм набором параметрів, серед яких є і параметри MAC-підрівня. Станції за допомогою точки доступу обмінюються між собою повідомленнями. При цьому повідомлення можуть бути кадрами даних або службовими (АСК, CTS, RTS). Отже, підсумовуючи вищевикладене, для сегменту безпроводної мережі можна виокремити наступні класи об'єктів (рисунок 2.2): клас TComp для опису станцій, клас TAccess для опису точок доступу, клас TMAC для опису MAC-підрівня станції чи точки доступу, клас TPACKets для опису кадрів даних та клас TService для опису службових повідомлень. Крім того, існують ще два класи об'єктів: клас TChannel для опису параметрів фізичного середовища мережі та клас TTimer для відтворення роботи мережі в часі.

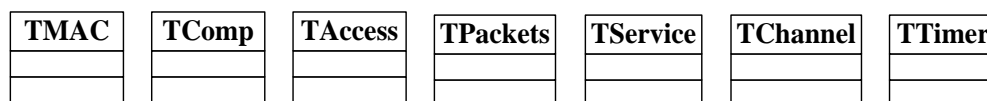


Рисунок 2.2 – Діаграма класів імітаційної моделі MAC-підрівня безпроводної мережі

Зупинимось детальніше на аналізі та описі кожного класу (рисунок 2.3).

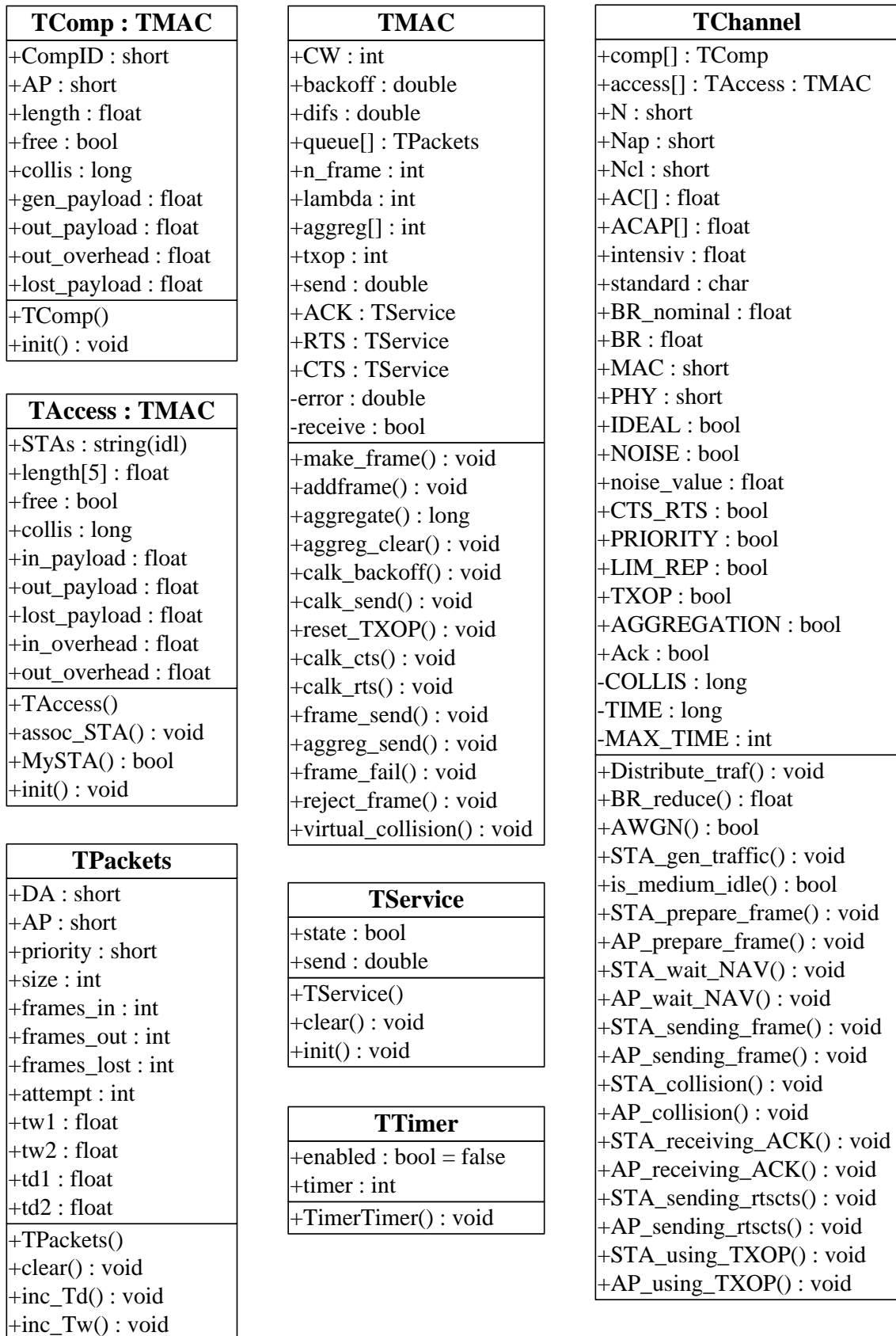


Рисунок 2.3 – Повна діаграма класів імітаційної моделі MAC-підрівня  
безпроводної мережі

Перш за все опишемо клас станції – TComp. Кожній станції присвоюється мітка (ідентифікатор) (CompID) для того, аби їх можна було правильно ідентифікувати в мережі. Оскільки комунікація станцій в мережі відбувається за допомогою точки доступу, то в атрибуті AP зберігається мітка точки доступу, з якою асоційована станція, а в атрибуті length – відстань до цієї точки доступу. Відстань між точкою доступу та станцією необхідна для визначення затримки розповсюдження сигналу. На зайнятість станцією прийомом або передачею кадру вказує атрибут free.

Для накопичення статистичної інформації про роботу станції існують такі атрибути: collis – кількість колізій, в які попали кадри станції, gen\_payload, out\_payload, out\_overhead, lost\_payload – кількість згенерованого, відправленого, службового та втраченого трафіку (в Мбайт) відповідно. Для початкової ініціалізації параметрів кожної станції існує конструктор TComp() та операція init(), параметрами якої є ідентифікатор станції та довжина до асоційованої точки доступу.

Імітаційна модель MAC-підрівня безпроводної мережі передбачає роботу в режимі Infrastructure Mode, що в свою чергу дає можливість моделювати та аналізувати розгалужені безпроводні мережі, які складаються з набору сегментів. Між собою сегменти зв'язуються за допомогою точок доступу. Для коректної ідентифікації станції-адресата при передачі кадру точкою доступу в класі TAccess існує атрибут STAs, в якому зберігаються усі ідентифікатори станцій, асоційованих з даною точкою доступу. Відповідно в класі TAccess необхідні операції асоціації станції з точкою доступу assoc\_STA() та перевірки адреси призначення кадру одній з асоційованих станцій MySTA(). В атрибуті length зберігаються значення відстаней до інших точок доступу. Аналогічно як і для станцій на зайнятість точкою доступу прийомом або передачею кадру вказує атрибут free. Для накопичення статистичної інформації про роботу точки доступу також існують атрибути: collis для числа колізій, в які попали кадри станції,



`in_payload`, `out_payload` та `lost_payload` для величин вхідного, відправленого та втраченого трафіку (в Мбайт) відповідно, `in_overhead` та `out_overhead` для величин вхідного та вихідного службового трафіку (в Мбайт) відповідно. Для початкової ініціалізації параметрів кожної точки доступу існує конструктор `TAccess()` та операція `init()`.

І клас `TComp` і клас `TAccess` є похідними від класу `TMAC`, який описує MAC-підрівень безпроводної мережі. Саме в класі `TMAC` визначається величина конкурентного вікна (`CW`), проміжку відтермінування (`backoff`), міжкадрового проміжку (`difs`). Згенеровані станцією (`make_frame()`) або прийняті точкою доступу (`addframe()`) кадри надходять до черги `queue`. Загальне число кадрів у черзі зберігається у атрибуті `n_frame`, а частота генерації нових кадрів регулюється значенням атрибуту `lambda`, інтенсивністю пуассонівського потоку кадрів, який в моделі використовується за замовчуванням. Стандартом безпроводної мережі 802.11e запропоновано для кращої утилізації каналу використовувати агрегацію кадрів, відповідно операцією `aggregate()` формується агрегований кадр в атрибуті `aggreg` або знищується операцією `aggreg_clear()`. Крім агрегації кадрів в стандарті 802.11e запропоновано безконкурентний проміжок TXOP, який в імітаційній моделі реалізується в класі `TMAC` за допомогою операції `reset_TXOP()` та атрибуту `txop`. Час, необхідний для передачі кадру, обчислюється операцією `calc_send()` та зберігається в атрибуті `send`. Залежно від методу доступу до фізичного середовища в класі `TMAC` формуються службові повідомлення АСК, RTS, CTS. Оскільки в безпроводному середовищі виявлення колізії неможливе, а констатація факту колізії відбувається за відсутністю службових повідомлень CTS або АСК, то в атрибуті `egot` визначатиметься час, протягом якого середовище буде зайняте колізією. Також в класі `TMAC` передбачено ряд операцій для реалізацій функцій MAC-підрівня: вибір проміжку зворотного відліку (`calc_backoff()`), фіксація успішної передачі

кадру (`frame_send()`) або агрегованого кадру (`aggreg_send()`), фіксація колізії (`frame_fail()`), вилучення кадру з черги (`reject_frame()`), формування службових повідомлень RTS (`calc_rts()`) та CTS (`calc_cts()`). Крім того, на MAC-підрівні розв'язується внутрішня колізія (`virtual_collision()`) між кадрами з різними категоріями доступу до середовища.

Повідомлення, якими обмінюються станції та точки доступу в імітаційній моделі, описуються класом `T_PACKETS`. Кожен кадр має атрибут `DA`, мітку станції призначення, та атрибут `AP`, мітка точки доступу, яка передаватиме кадр далі. Кадри в імітаційній моделі можуть бути з різним пріоритетом (`priority`) та різного розміру (`size`). Оскільки кадри попадають до черги `queue` в класі `MAC`, то в класі `T_PACKETS` присутні атрибути, в яких накопичується статистична інформація про кількість кадрів, які надійшли до черги (`frames_in`), успішно відправлені (`frames_out`) чи видалені з черги (`frames_lost`), тобто кадрів, для яких вичерпано число спроб передачі (`attempt`) або для яких закінчився їх життєвий цикл (за замовчуванням 512 мс [5]). Для визначення такої характеристики мережі, як середній час очікування/доставки кадру використовуються атрибути `tw1/td1` та `tw2/td2`, в яких за допомогою операцій `inc_Tw()/inc_Td()` запам'ятовуються відповідно початок та кінець періоду очікування/доставки кадру. При цьому період доставки містить в собі час очікування та час передачі. Для початкової ініціалізації параметрів кадру існує конструктор `T_PACKETS()`, а для знищення кадру – операція `clear()`.

Крім кадрів з корисною інформацією в мережі передаються службові повідомлення, які описуються класом `T_SERVICE`. Клас містить лише два атрибути. Перший з них – `state`. Він показує, чи активне в даний час службове повідомлення. Другий параметр – `send`, для службових повідомлень визначає необхідний час для їх надсилання. Якщо цей параметр стає від'ємним, це означає, що відбулась колізія або існує прихований вузол. Значення атрибутів по замовчуванню налаштовуються конструктором

TService(), а під час роботи моделі – операцією init(). Для знищення повідомлення використовується операція clear().

Передача повідомлень відбувається через фізичне середовище, яке описується класом TChannel. Середовище зв'язує між собою N станцій та N<sub>ap</sub> точок доступу, для яких визначено N<sub>cl</sub> категорій доступу. Для станцій та точок доступу в атрибутах AC та ACAP визначено набір MAC-параметрів, які залежать від класу доступу: розмір кадру, мінімальне та максимальне значення вікна конкуренції, величина міжкадрового та безконкурентного проміжків, число допустимих повторних передач кадру. Крім того, для кожного класу доступу визначена його частка у загальному трафіку станції, оскільки в реальних мережах трафік не розподіляється рівномірно за класами доступу, частотою та характером появи. В залежності від стандарту (standard), згідно якого функціонує мережа, кадри матимуть різні значення заголовків на MAC-підрівні та фізичному підрівні (атрибути MAC та PHY відповідно), і передаватимуться зі швидкістю BR або BR\_nominal, за умови, що середовище є ідеальним (на що вказує атрибут IDIAL), тобто таким, де не враховується зниження пропускної здатності мережі з відстанню за наявності перешкод для сигналу. Зниження пропускної здатності за умови неідеальності каналу в залежності від відстані між станцією та точкою доступу, розраховується операцією BR\_reduce() на основі даних реальних експериментів [81, 82, 83]. Крім того, за неідеальних умов існує ймовірність присутності шуму в каналі (NOISE). Для безпроводних мереж прийнято вважати, що шумом є адитивний білий гаусівський шум [8]. В залежності від рівня шуму (noise\_value) за допомогою операції AWGN() визначається ймовірність спотворення кадру появою завади.

Завантаженість мережі задається атрибутом intensiv та розподіляється між станціями за допомогою операції Distribute\_traf(). Для управління використанням тих чи інших функцій MAC-підрівня в класі TChannel існує

ряд атрибутів: CTS\_RTS – застосування схеми доступу RTS/CTS, PRIORITY – введення класів доступу, LIM\_REP – обмеження числа повторних передач кадру, TXOP – використання безконкурентного проміжку при передачі кадрів, AGGREGATION – застосування агрегації кадрів, Ack – необхідність підтвердження прийому кадру службовим повідомленням ACK.

Для узгодження дій станцій та точок доступу між собою, їх реакцію на зміну стану каналу в класі TChannel описані основні кроки роботи мережі: генерація станціями кадрів (STA\_gen\_traffic()), перевірка середовища на вільність (is\_medium\_idle()), підготовка станціями/точками доступу кадру до передачі (STA\_prepare\_frame()/AP\_prepare\_frame()), очікування міжкадрового проміжку та проміжку зворотного відліку (STA\_wait\_NAV()/AP\_wait\_NAV()), передача кадру (STA\_sending\_frame()/AP\_sending\_frame()), обробка колізії (STA\_collision()/AP\_collision()), очікування кадру підтвердження (STA\_receiving\_ACK()/AP\_receiving\_ACK()), надсилання кадрів RTS/CTS (STA\_sending\_rtscts()/AP\_sending\_rtscts()), передача кадрів протягом безконкурентного проміжку (STA\_using\_TXOP()/AP\_using\_TXOP()).

Оскільки робота моделі обмежена в часі, то відлік часу веде таймер, який описується класом TTimer. Цей клас містить два атрибути. Один з них (enabled) є ознакою того, чи таймер працює. Інший (timer) є періодом виклику таймеру. За замовчуванням операція TimerTimer() викликається щосекунди.

Взаємозв'язок об'єктів різних класів зображено на рисунку 2.4.

Об'єкти повідомлень (queue, ACK, RTS, CTS) є складовими елементами об'єктів станцій (comp) та точок доступу (access), які, в свою чергу, є складовими об'єкту середовища (channel). Також між собою пов'язанні об'єкти середовища та таймеру, оскільки він контролює тривалість процесу моделювання роботи безпроводної мережі. На діаграмі

також приведено кратність відношень між об'єктами – кількість об'єктів одного класу, зв'язаних з одним об'єктом іншого класу.

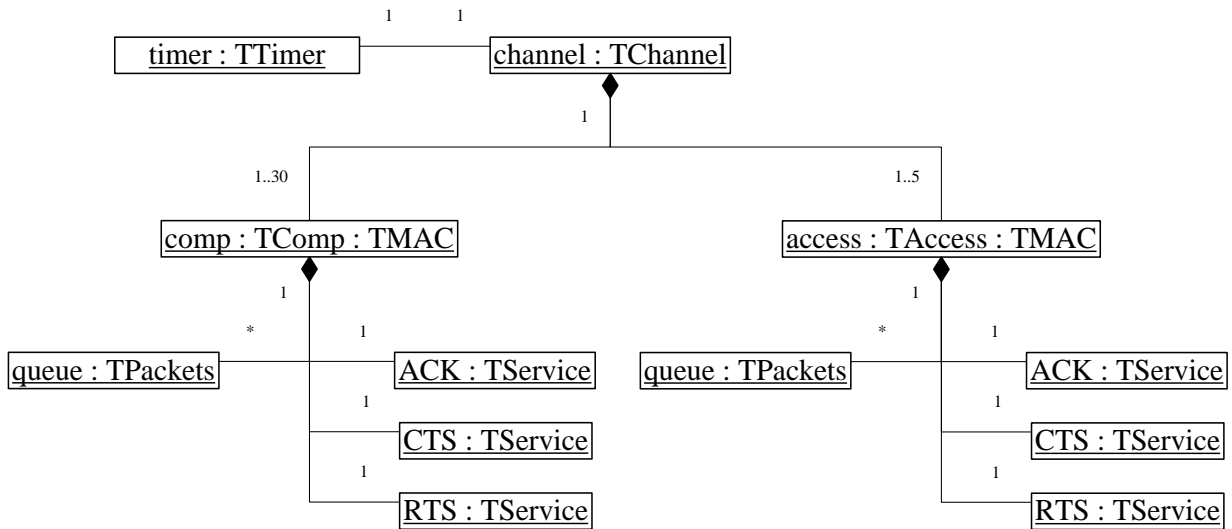


Рисунок 2.4 – Діаграма агрегації об'єктів імітаційної моделі MAC-підрівня безпроводної мережі

Взаємозв'язок об'єктів імітаційної моделі MAC-підрівня безпроводної мережі має якомога точніше відповідати функціонуванню елементів безпроводної мережі. В кожен момент часу об'єкти знаходяться в певному стані, який відповідає тій чи іншій події в безпроводній мережі. На діаграмі станів (рисунок 2.5) зображено послідовність переходу з одного стану імітаційної моделі в інший.

Об'єкти змінюють свій стан у відповідь на події, які відбуваються з плином часу, який регулюється роботою таймеру. З кожним відліком таймеру в мережі генерується величина трафіку кожної станції в залежності від заданої завантаженості мережі intensive. За замовчуванням кадри надходять в черги станцій згідно пуассонівського потоку [39, 40] з інтенсивністю  $\lambda$ . Якщо в роботі моделі мережі передбачено агрегацію кадрів, в залежності від ідентифікатора адресата станція об'єднує кадри в один агрегований. Далі станція обчислює величину проміжку зворотного відліку та необхідний час для передачі кадру. Після чого станція переходить

у стан прослуховування каналу та відліку проміжку backoff згідно методу CSMA/CA. За умови, що після очікування проміжку backoff канал вільний станція безпосередньо переходить у стан передачі кадру або, у випадку задіяння механізму RTS/CTS, після успішних передачі та прийому службових кадрів RTS та CTS.

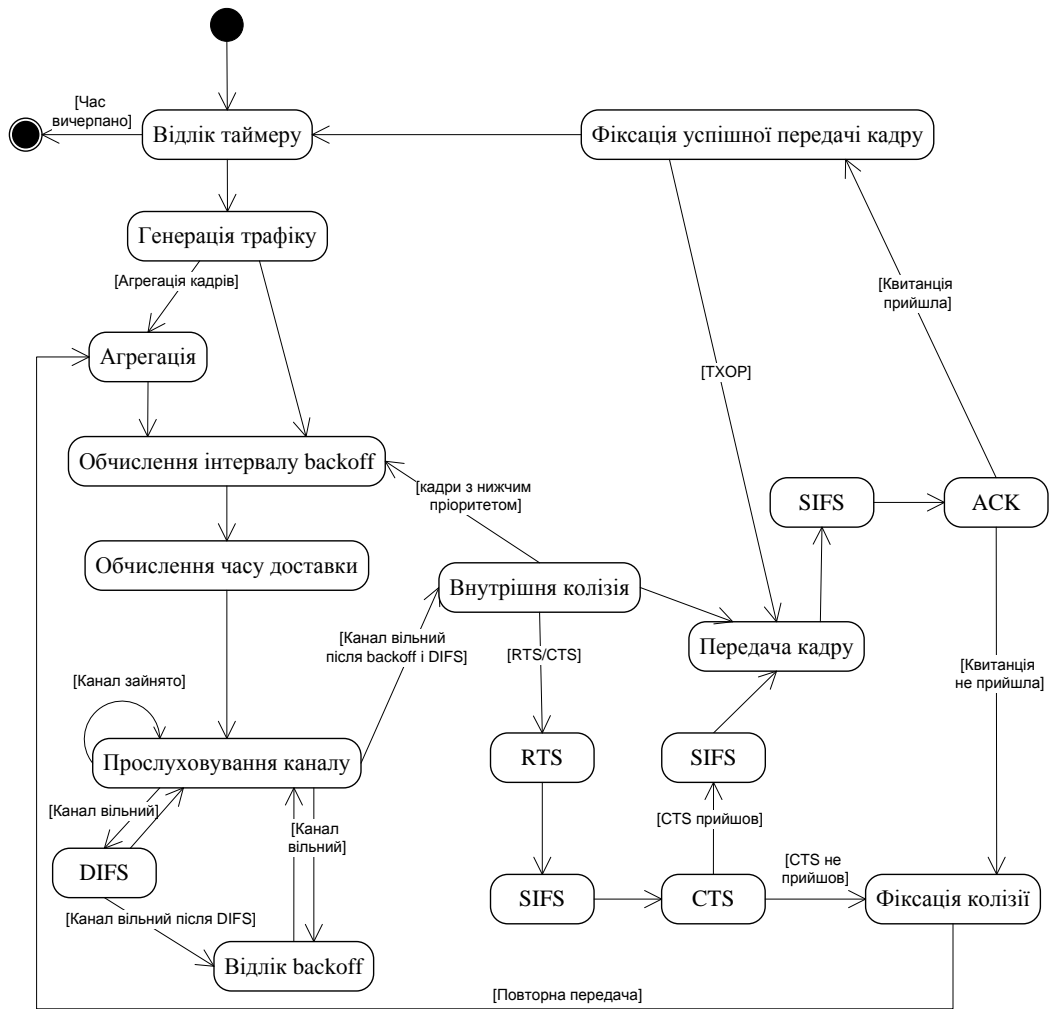


Рисунок 2.5 – Діаграма станів для імітаційної моделі MAC-підрівня  
безпроводної мережі

Втрата кадру у мережі може виникнути у двох випадках: колізія внаслідок одночасного доступу до середовища двох або більше станцій і, відповідно, інтерференції сигналів на фізичному рівні. У другому випадку втрата кадру може стати наслідком появи завади, яка спотворює фізичний сигнал, та робить неможливим його прийом.

В імітаційній моделі МАС-підрівня за замовчуванням реалізовано механізм появи адитивного білого шуму. Модель переходить у стан колізії, коли у відповідь на передачу кадру не прийшла квитанція АСК про успішний прийом або відсутність кадру CTS у відповідь на передачу кадру RTS. Якщо станція отримала кадр АСК, то в моделі фіксується успішна передача кадру.

Діаграма станів для точок доступу буде аналогічною, за виключенням стану “Генерація трафіку”, оскільки точки доступу здебільшого передають ті повідомлення, які надходять від станцій.

При розробці імітаційної моделі МАС-підрівня слід врахувати той факт, що в реальній мережі події можуть виникати одночасно, тоді як модель опрацьовує послідовно подію за подією. Аби відобразити, як модель імітує роботу безпроводної мережі в кожен момент часу, побудовано діаграму слідування (рисунок 2.6).

Діаграма слідування показує часову динаміку взаємодії. Основна ідея зводиться до того, що взаємодія об’єктів моделі відбувається в заданій послідовності, і для виконання цієї послідовності від початку до кінця потрібен час. Така послідовність задається в процесі розробки моделі, і для її відображення використовується діаграма слідування. Об’єкти розміщуються у верхній частині діаграми, а час змінюється зверху донизу. Від кожного зображеного на діаграмі об’єкту опускається лінія його життя.

Повідомлення, які передають об’єкти, зображуються у вигляді ліній зі стрілками на кінці, які з’єднують одну лінію життя з іншою. Розміщення повідомлень вздовж вертикального напрямку відповідає часу їх передачі. Вузкий прямокутник на лінії життя об’єкту є точкою активації – виконання однієї з операцій об’єкту.

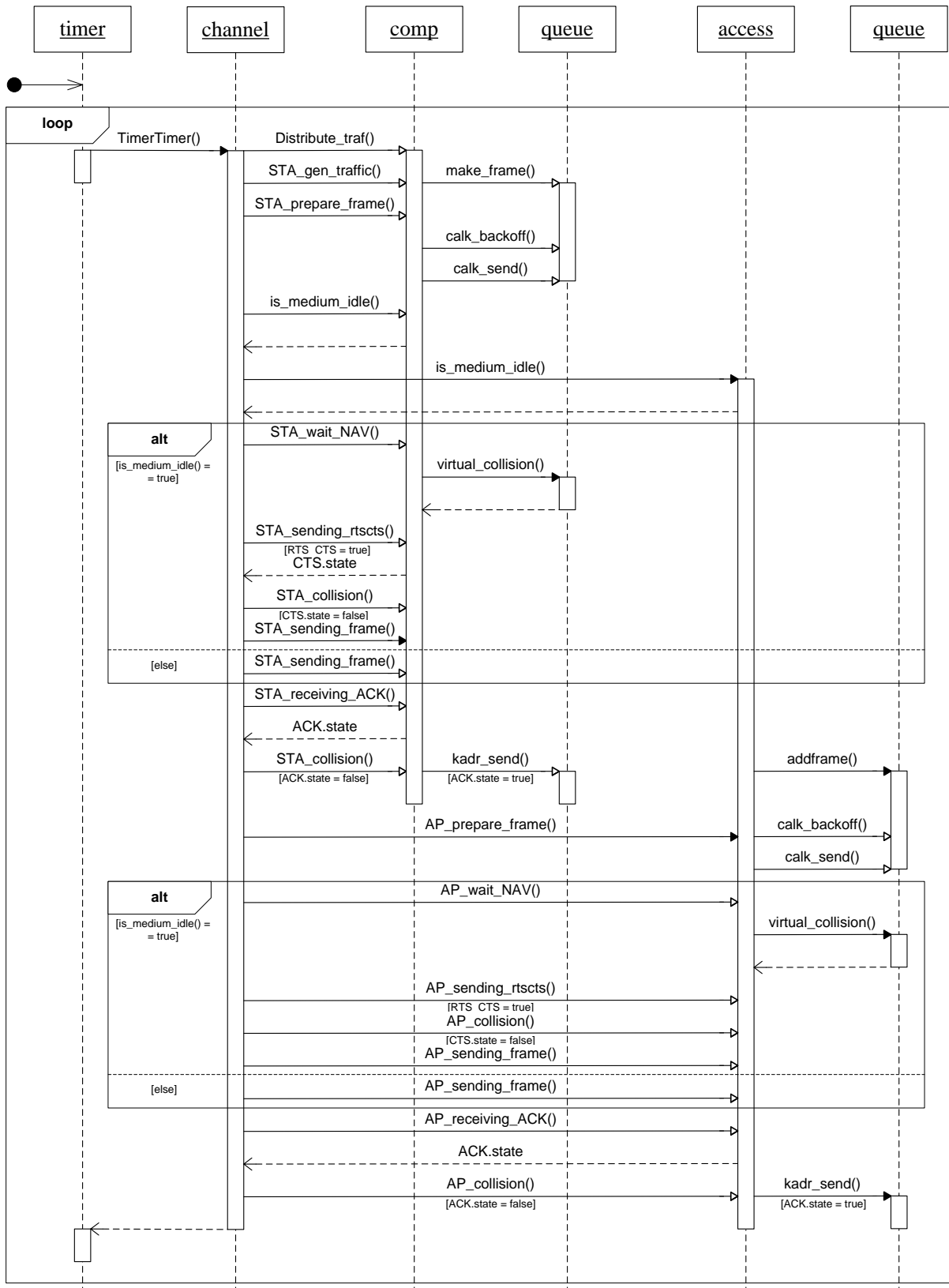


Рисунок 2.6 – Діаграма слідування для імітаційної моделі MAC-підрівня  
безпроводної мережі



В моделі MAC-підрівня безпроводної мережі може знаходитись  $N$  станцій та  $N$ р точок доступу. Кожен з об'єктів станцій чи точок доступу може знаходитись в одному зі станів, зображених на рисунку 2.5. Відповідно об'єкт channel послідовно опрацьовує усі об'єкти станцій та точок доступу. В залежності від стану станції чи точки доступу та стану решти об'єктів викликається відповідний метод.

На початку кожної секунди об'єкт channel випадковим чином перерозподіляє задану завантаженість мережі, формуючи величини трафіку, який буде згенерований станціями в наступну секунду. Далі для кожної станції в залежності від величини трафіку визначається параметр  $\lambda$  пуассонівського потоку, який визначає частоту надходження кадрів до черги станції. Якщо станція згенерувала кадр, він надходить до черги. У випадку використання агрегації станція об'єднує кадри згідно стандарту [5] в один агрегований кадр. Далі для кадру обчислюються величина проміжку backoff та необхідний час для його передачі.

Середовище опитує усі станції та точки доступу, чи хтось з них не знаходиться в стані передачі. У випадку, якщо середовище вільне, станції, які мають кадри для передачі, очікують проміжок зворотного відліку. Станції, які завершили очікування проміжку зворотного відліку, перевіряють свої черги на предмет внутрішньої колізії та переходять до передачі кадру або передачі кадру RTS, якщо в моделі включено механізм RTS/CTS. Стан false кадру CTS говорить про колізію, яка відбулась в мережі.

У випадку зайнятого середовища опрацьовується передача кадру тієї станції чи точки доступу, яка його зайняла. Відправивши кадр, станція очікує на квитанцію підтвердження АСК, якщо вона не прийшла – відбулась колізія, інакше – кадр успішно прийнято точкою доступу та його додано в чергу точки доступу. Далі, аналогічно як для станцій, середовище опрацьовує точки доступу.

### 2.3. Моделі потоку трафіку та стану середовища безпроводної мережі

Імітаційна модель MAC-рівня поетапно відтворює події, які виникають в мережі. Зважаючи на те, що імітаційна модель відтворює події, які відбуваються з плином часу, а при моделюванні одиниця часу не може бути нескінченно малою величиною, необхідно вибрати певний постійний інтервал часу, для якого буде справедливим твердження, що події відбулись одночасно, якщо відстань між ними менша за цей інтервал. Для безпроводних мереж таким часовим інтервалом може бути слот часу, довжина якого залежить від особливостей реалізації фізичного рівня, так, наприклад, для мереж стандарту 802.11g слот часу рівний 20 мкс [5].

Завантаженість безпроводних мереж є змінною величиною та коливається з часом, рідше – насиченою, коли в чергах станцій постійно знаходяться кадри для передачі. В моделі передбачено можливість встановлення та зміни завантаженості під час імітації роботи мережі. Завантаженість характеризує величину висхідного трафіку усіх станцій та точок доступу, тобто той трафік, який мережі необхідно передати, відносно максимальної пропускної здатності мережі. Припустимо, завантаженість мережі становить  $X\%$  від максимальної пропускної здатності  $BR$  Мбіт/с, тоді пропускна здатність мережі  $S$  становить:

$$S = \frac{X \times BR}{100} \text{ [Мбіт/с]}. \quad (2.1)$$

Оскільки точки доступу передають увесь згенерований станціями трафік, тобто висхідний трафік точки доступу рівний сумі висхідних трафіків станцій асоційованих з нею, то половина завантаженості мережі припадатиме на станції, а друга половина – на точки доступу. Таким чином величина згенерованого станціями трафіку відносно завантаженості мережі становитиме:

$$S_{st} = 0.5S, \text{ [Мбіт/с]}. \quad (2.2)$$

В імітаційній моделі MAC-підрівня передбачено два режими розподілу завантаженості між станціями, один з них – рівномірний розподіл між усіма присутніми в мережі станціями, тоді висхідний трафік кожної станції рівний:

$$s_i^{st} = \frac{S_{st}}{N}, \quad (i = 1, \dots, N), \text{ [Мбіт/с]}, \quad (2.3)$$

де  $N$  – кількість станцій в безпроводній мережі.

В переважній більшості аналітичних моделей автори припускають, що трафік розподіляється рівномірно між станціями [47, 48, 49, 50, 52, 59, 62], тоді як насправді інтенсивність надходження кадрів в мережу для одних станцій може бути високою, для інших – низькою, при цьому вона змінюється з часом. Враховуючи дану особливість, в мережі передбачено другий режим розподілу завантаженості між станціями, згідно якого висхідний трафік кожної станції визначається як:

$$s_i^{st} = S_{st} \frac{k_i}{\sum_i k_i}, \quad (i = 1, \dots, N), \text{ [Мбіт/с]}, \quad (2.4)$$

де  $N$  – кількість станцій в безпроводній мережі;  $k_i$  – випадкове число з проміжку  $[0, 1]$ , при цьому величина  $k_i / \sum_i k_i$  характеризує частку загальної завантаженості для кожної станції.

Знаючи розмір трафіку, який має згенерувати станція, можна обчислити середню частоту надходження кадрів в чергу станцій:

$$f_i^{st} = \frac{s_i^{st} \sigma}{8F}, \quad (i = 1, \dots, N), \text{ [кадрів/слот часу]}, \quad (2.5)$$

де  $\sigma$  – величина слоту часу в мкс,  $F$  – середній розмір кадру в байтах.

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, тоді як потоковий трафік, такий як голосовий, має відносно низьку зміну інтенсивності та зазвичай має перерви. Найкраще такий потік кадрів станції описується пуассонівським потоком з інтенсивністю  $\lambda$  [39, 40].

Пуассонівські потоки широко застосовуються як моделі реальних потоків завдяки тому, що володіють важливою властивістю адитивності [39]. Якщо взяти  $N$  джерел пуассонівських потоків подій з інтенсивностями  $\lambda_i$ , та розглядати новий потік як сумарний потік всіх подій від цих джерел, то результуючий потік також є пуассонівським з інтенсивністю:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \lambda_i. \quad (2.6)$$

На рисунку 2.7 зображено густину пуассонівського потоку, як бачимо, вхідний потік кадрів є суттєво пульсуючим завдяки ненульовій ймовірності того, що інтервал між кадрами буде дуже маленьким, близьким до нуля, а також того, що він буде дуже великим.

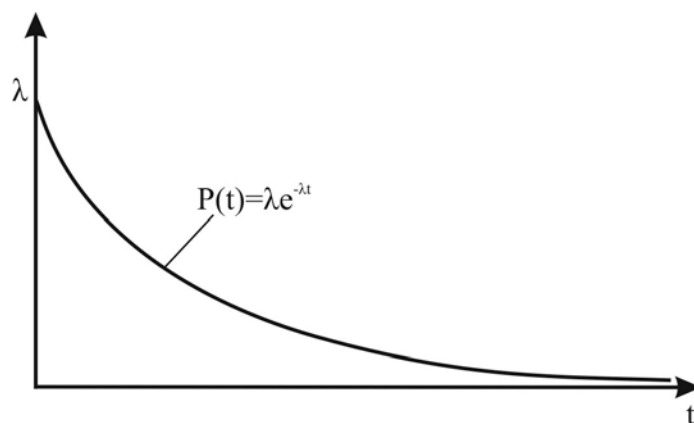


Рисунок 2.7 – Густина розподілу вхідного пуассонівського потоку кадрів

Якщо ймовірність надходження  $k$  кадрів за час  $t$  розподілена згідно закону Пуассона:

$$P(t) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}, \quad (2.7)$$

де  $\lambda = f_{st}$  – середня частота надходження кадрів, то час між кадрами  $t$  може бути обчислений як:

$$t = -\frac{1}{f_{st}} \ln(R), \quad (2.8)$$

де  $R$  – випадкове число з проміжку  $[0, 1]$ .

Згенеровані кадри надходять в чергу (або черги, якщо існує декілька пріоритетів обслуговування кадрів) станції. Черги працюють за принципом FIFO (First In First Out), тобто кадри опрацьовуються та передаються в порядку їх надходження до черг. В мережах з комутацією пакетів алгоритм FIFO використовується за замовчуванням [5, 84]. Перевагою такого підходу є простота реалізації та відсутність потреби налаштування. Розмір черги зазвичай є обмеженим, оскільки розмір буферу мережевого пристрою не є безмежним. Відповідно можлива ймовірність відкидання кадру з черги, через її переповнення, або при вичерпанні часу життя кадру. В імітаційній моделі МАС-підрівня передбачено використання як обмежених черг так і нескінченно довгих, оскільки в більшості аналітичних моделей прийнято припущення про нескінченно довгу чергу для нехтування ймовірності втрати кадрів через переповнення черги.

Втрата кадру у мережі може виникнути у двох випадках: одночасний доступ до середовища двох або більше станцій і, як наслідок, інтерференція сигналів на фізичному рівні. У другому випадку кадр може бути втрачено внаслідок виникнення завади, яка спотворює фізичний сигнал, та робить неможливим його прийом.

В реальних каналах зв'язку сигнали при передачі спотворюються, що призводить до прийому кадру з деякою помилкою. Причиною таких

помилки є спотворення, які вносить сам канал, та завади, які впливають на сигнал.

Спотворення, які вносить канал, можуть бути лінійними та нелінійними. Вони усуваються шляхом відповідної корекції характеристик каналу.

На відміну від спотворень завади носять випадковий характер. Вони невідомі заздалегідь та не можуть бути повністю усунені. Завади в каналі є флуктуаційними явищами (випадковими коливаннями струму та напруги), пов'язані з тепловими процесами в елементах електричних схем, індукційними процесами під дією атмосферних явищ (грозові розряди тощо) та індустриальних процесів (робота промислових установок, інших ліній зв'язку тощо). Такі завади є адитивними, оскільки накладаються на основний інформаційний сигнал. Математичною моделлю флуктуаційної адитивної завади є гаусівський “білий шум” [85]. Гаусівський “білий шум” є нормальним розподілом з нульовим математичним сподіванням та одиничною дисперсією [8]:

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.9)$$

де  $a$  – математичне сподівання,  $\sigma$  – дисперсія.

Оскільки математичне сподівання для гаусівського “білого шуму” рівне нулю, а дисперсія – одиниці, то (2.9) набуде вигляду:

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-t^2/2}. \quad (2.10)$$

Згідно “правила трьох сигм” [86], для нормального розподілу в області  $-\sigma < t < \sigma$  зосереджено 68% відсотків площі розподілу, в області  $-2\sigma < t < 2\sigma$  – 95.4% площі розподілу, а в області  $-3\sigma < t < 3\sigma$  зосереджено 99.7% площі розподілу. Відповідно, можна припустити, що рівень шуму в мережі відповідає ймовірності попадання нормально розподіленої величини в

певний діапазон значень. Діапазон значень можна знайти, знайшовши вираз для  $t$  з (2.10):

$$t = \pm \sqrt{2 \ln \left( \frac{1}{P \sqrt{2\pi}} \right)}, \quad (2.11)$$

де  $P$  – ймовірність попадання випадкового числа в проміжок  $(-\infty, -t]$  або  $[t, +\infty)$ . Наприклад, при рівні шуму 10% кадр буде втрачено, якщо для нього нормально розподілена випадкова величина попаде в діапазон значень  $|t| \geq 1.6635$  згідно формули (2.11).

Крім рівня шуму при поширенні сигналу слід враховувати його згасання як наслідок його відбиття, дифракції та розсіювання, при чому величина згасання сигналу залежить як від відстані від точки передачі, так і від частоти сигналу. Величину згасання сигналу в децибелах обчислюють згідно формули [87]:

$$PL(d) = 10 \lg \left( \frac{4\pi df}{c} \right), \quad (2.12)$$

де  $d$  – відстань від точки передачі (м),  $f$  – частота сигналу (Гц),  $c$  – швидкість світла ( $\approx 3 \times 10^8$  м/с). Проте варто відзначити, що в цій моделі згасання не враховано особливості середовища поширення сигналу. На практиці було показано [88], що згасання сигналу краще описує логарифмічно-нормальна модель згасання сигналу (log-distance model), згідно якої потужність сигналу (в дБм) на відстані  $d$  (в м) від передавача буде рівна:

$$P_r(d) = P_{r0} - 10\alpha \lg(d) + X_\sigma, \quad (2.13)$$

де  $P_{r0}$  – потужність сигналу на відстані 1 м від передавача (в дБм),  $\alpha$  – так звана експонента втрат на шляху ( $\alpha = 3.32$  для відкритого простору та  $\alpha = 4.02$  для приміщення),  $X_\sigma$  – випадкове гаусівське число з нульовим математичним сподіванням та дисперсією  $\sigma$  ( $\sigma = 3.1$  дБ для відкритого

простору та  $\sigma = 7.36$  дБ для приміщення). Потужність сигналу (в дБм) на відстані 1 м від передавача обчислюється як:

$$P_{r0} = P_t - PL(1), \quad (2.14)$$

де  $P_t$  – потужність антени передавача (дБм). Максимальна потужність передавача не повинна перевищувати 15-20 дБм [5, 8, 87].

Підставивши (2.14) в (2.13) та спростивши вираз, отримуємо:

$$P_r(d) = P_t + 73.78 - 10\lg(f) - 10\alpha\lg(d) + X_\sigma. \quad (2.15)$$

Стандартом 802.11 регламентовано мінімальний рівень чутливості приймача, при якому сигнал буде виокремлено та розпізнано. Крім того, передбачено механізм динамічної зміни швидкості передачі (Dynamic Rate Shifting), який забезпечує автоматичний вибір найкращої швидкості з'єднання в залежності від співвідношення сигнал/шум в каналі та наявності завад шляхом зміни модуляції сигналу. В таблиці 2.1 [5, 8] наведено значення чутливості приймача та швидкості передачі для стандартів 802.11g та 802.11n, які працюють в частотному діапазоні 2.4 ГГц з шириною каналу 20 МГц та захисним інтервалом 800 нс.

Таблиця 2.1.

Залежність швидкості передачі від чутливості приймача

Модуляція та схема кодування	Швидкість передачі (Мбіт/с)					Чутливість приймача (дБм)
	802.11g	802.11n				
		1 канал	2 канали	3 канали	4 канали	
BPSK 1/2	6	6.5	13	19.5	26	-82
BPSK 3/4	9	–	–	–	–	-81
QPSK 1/2	12	13	26	39	52	-79
QPSK 3/4	18	19.5	39	58.5	78	-77
16-QAM 1/2	24	26	52	78	104	-74
16-QAM 3/4	36	39	78	117	156	-70
64-QAM 2/3	48	52	104	156	208	-66
64-QAM 3/4	54	58.5	117	175.5	234	-65
64-QAM 5/6	–	65	130	195	260	-64



Таким чином, обчисливши величину потужності сигналу на визначеній відстані від передавача за допомогою формули (2.15) та користуючись таблицею 2.1, можна знайти максимальну швидкість передачі на певній відстані від передавача, величина якої зумовлена рівнем шуму та згасанням сигналу.

За замовчуванням в імітаційній моделі MAC-підрівня реалізовано потік кадрів як пуассонівський потік, а модель шуму як гаусівський “білий шум”, проте застосований об’єктно-орієнтований підхід при розробці імітаційної моделі MAC-підрівня дозволяє реалізувати будь-які інші моделі надходження кадрів в черги чи появи завад у фізичному середовищі.

## **2.4. Верифікація результатів роботи імітаційної моделі MAC-підрівня**

### **2.4.1. Верифікація за допомогою аналітичних моделей**

Для порівняння результатів роботи імітаційної моделі MAC-підрівня були обрані аналітичні моделі, які найбільш повно описують роботу безпроводної мережі при базовій схемі доступу DCF – та пріоритетній схемі доступу EDCA, а саме: моделі Бьянкі [42], Даффі [47], Ханга [50], Ксяо [10], Банчса [65], Енгельштада [60] та Жанга [94] (моделі названі за прізвищем першого автора).

При моделюванні MAC-підрівня безпроводної мережі, яка працює згідно схеми доступу DCF, для усіх моделей були прийняті однакові параметри MAC та фізичного рівнів згідно стандарту 802.11g (таблиця 2.2).

#### *Мережа з насиченою завантаженістю*

Для верифікації результатів роботи розробленої імітаційної моделі MAC-підрівня було проведено моделювання MAC-підрівня безпроводної 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 2.8 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 2.9) 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, згідно [95], є достатньою точністю. Отже, можна вважати, що результати імітаційного моделювання добре узгоджуються з більшістю аналітичних моделей.

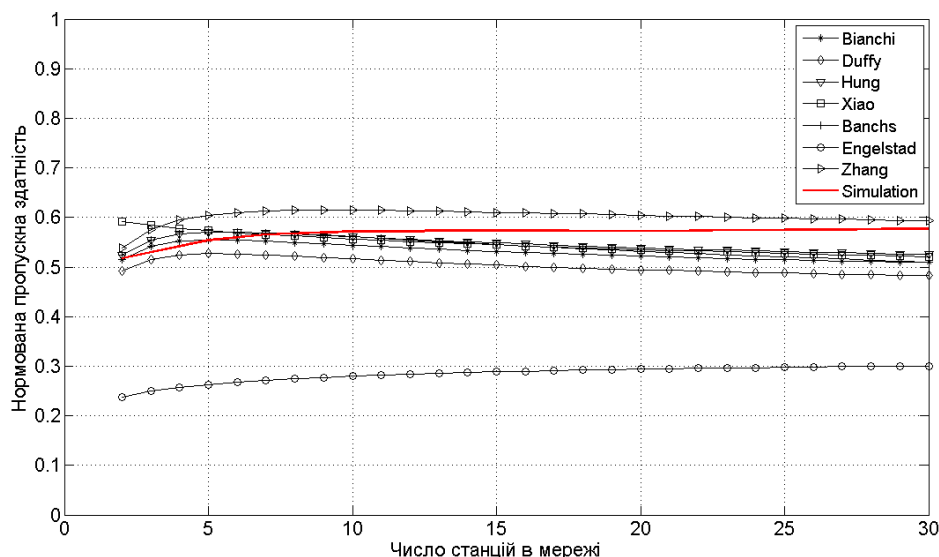


Рисунок 2.8 – Нормована пропускна здатність мережі в насиченому режимі при механізмі доступу до фізичного середовища DCF

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 [60].

Крім пропускної здатності було досліджено також середній час доставки кадру. В безпроводній мережі, яка працює в насиченому режимі, середній час доставки кадру практично лінійно зростає зі збільшенням числа станцій в мережі (рисунок 2.9). 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.

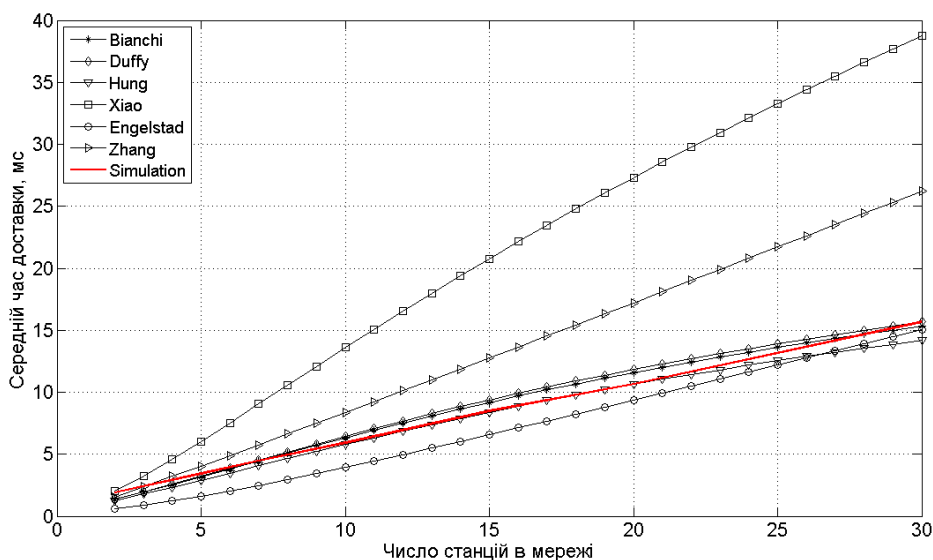


Рисунок 2.9 – Середній час доставки кадрів в мережі з насиченою завантаженістю при механізмі доступу до фізичного середовища DCF

Аналогічні експерименти були проведені і для випадку роботи безпроводної 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 2.3).

Таблиця 2.3.

Параметри MAC-підрівня для категорій доступу

	AC0	AC1	AC2	AC3
<b>CWmin</b>	31	31	15	7
<b>CWmax</b>	1023	1023	31	15
<b>AIFS (мкс)</b>	150	70	50	50

На рисунку 2.10 зображено нормовану пропускну здатність мережі згідно механізму доступу EDCA для високопріоритетних класів доступу AC2 і AC3 (рисунок 2.10а) та для низькопріоритетних – AC0 і AC1

(рисунок 2.10б). Для усіх залежностей можна виділити спадний характер пропускної здатності зі збільшенням кількості станцій в мережі.

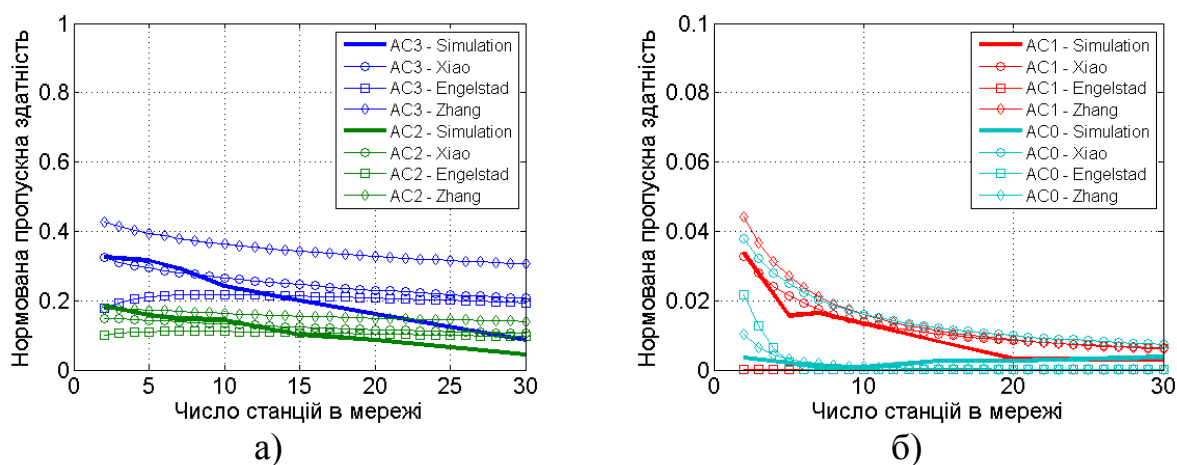


Рисунок 2.10 – Нормована пропускна здатність мережі в насиченому режимі при механізмі доступу до фізичного середовища EDCA для а) високопріоритетних та б) низькопріоритетних класів доступу

Результати значень пропускної здатності мережі для різних аналітичних моделей відрізняються між собою, особливо для високопріоритетного трафіку (AC3) (рисунок 2.10а).

Для класів доступу AC0 та AC1 пропускна здатність є найнижчою та становить 0.5-4 % від швидкості передачі (рисунок 2.10б), 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 2.10а) 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 АСЗ різниця значень пропускної здатності аналітичних моделей Жанга та Енгельштада становить 0.11, тоді як різниця значень розробленої імітаційної моделі МАС-підрівня та моделі Енгельштада – 0.1. Це може бути зумовлено нюансами функціонування безпроводної 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 кадру, а не на його передачу. Зобразивши окремо пропускну здатність точки доступу та усереднену пропускну здатність станції (рисунок 2.11), 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 2.12), 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.

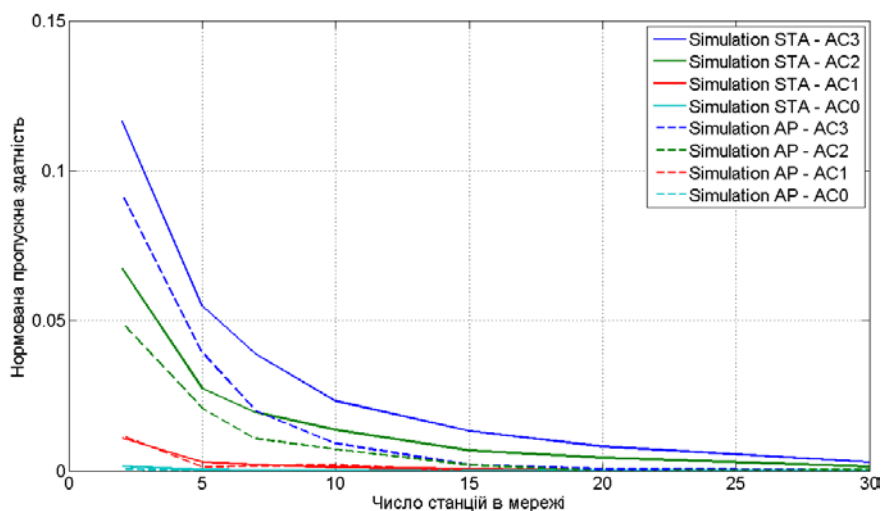


Рисунок 2.11 – Нормована пропускна здатність точки доступу та станції в насиченому режимі при механізмі доступу до фізичного середовища EDCA

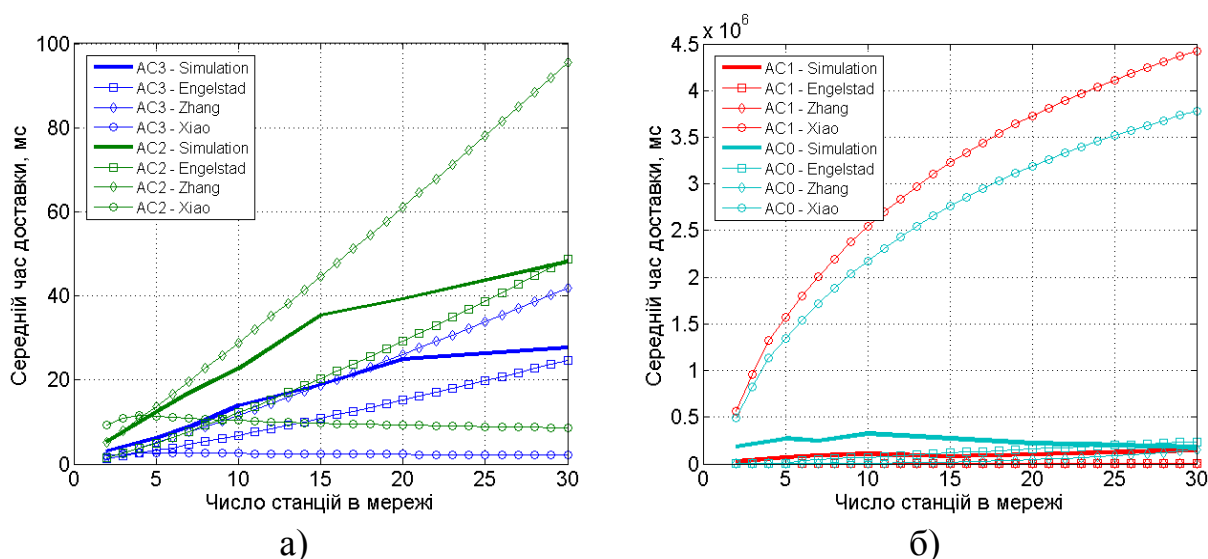


Рисунок 2.12 – Середній час доставки кадрів в мережі з насиченою завантаженістю при механізмі доступу до фізичного середовища EDCA для а) високопріоритетних та б) низькопріоритетних класів доступу

Крім того, відзначимо, що сумарна пропускна здатність безпроводної мережі згідно схеми доступу EDCA нижча, ніж згідно схеми доступу DCF (рисунок 2.13). При цьому чим більше станцій в безпроводній мережі, тим меншу пропускну здатність забезпечує схема доступу EDCA в насиченому режимі, в порівнянні зі схемою доступу DCF.

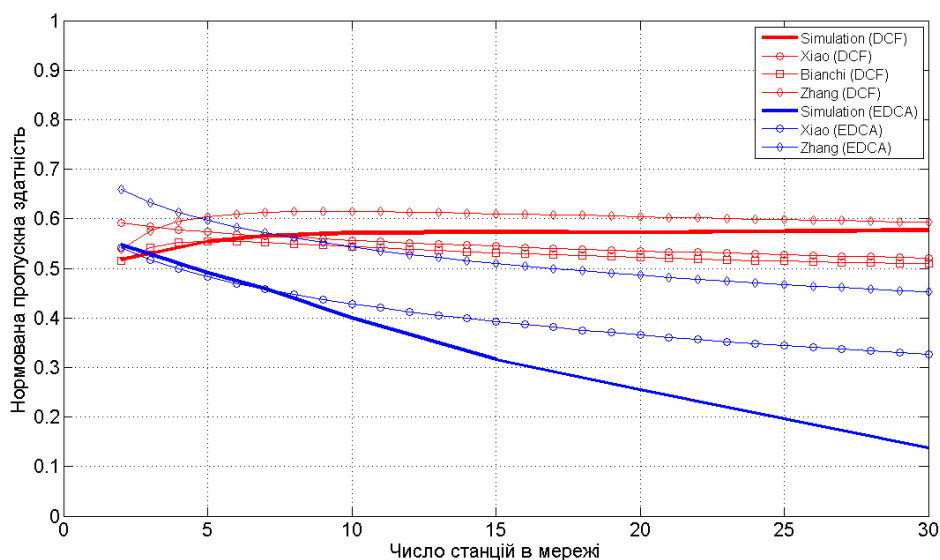


Рисунок 2.13 – Загальна нормована пропускна здатність у випадку насиченої завантаженості

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 безпроводної 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 безпроводної мережі в насиченому режимі, було проведено дослідження роботи безпроводної мережі, в якій завантаженість плавно змінюється від



низької до насиченої, та порівняно результати з даними аналітичного моделювання.

На рисунку 2.14 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 2.2.

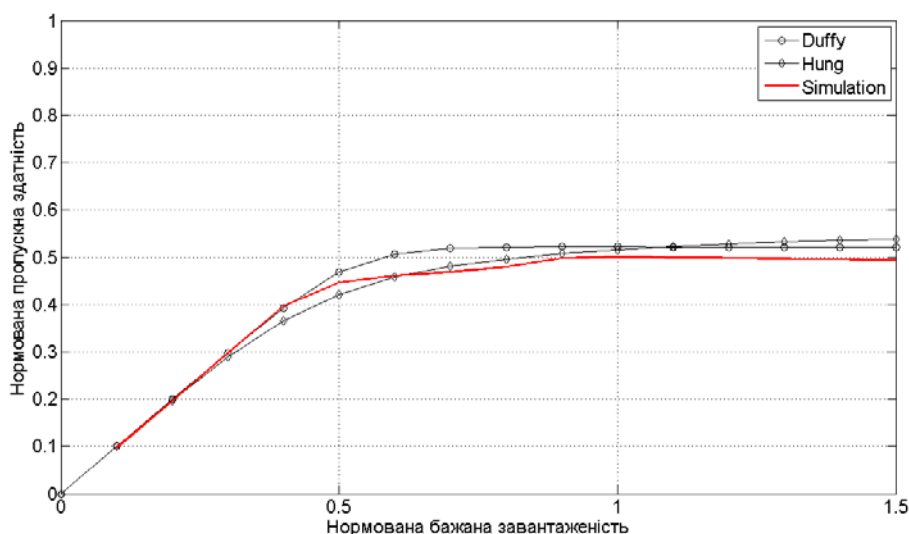


Рисунок 2.14 – Нормована пропускну здатність мережі зі змінною завантаженістю при механізмі доступу до фізичного середовища DCF

Результати імітаційного моделювання досить близько повторюють аналітичні розрахунки для моделей Даффі [47] та Ханга [50]. 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 пропускну 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 2.15.

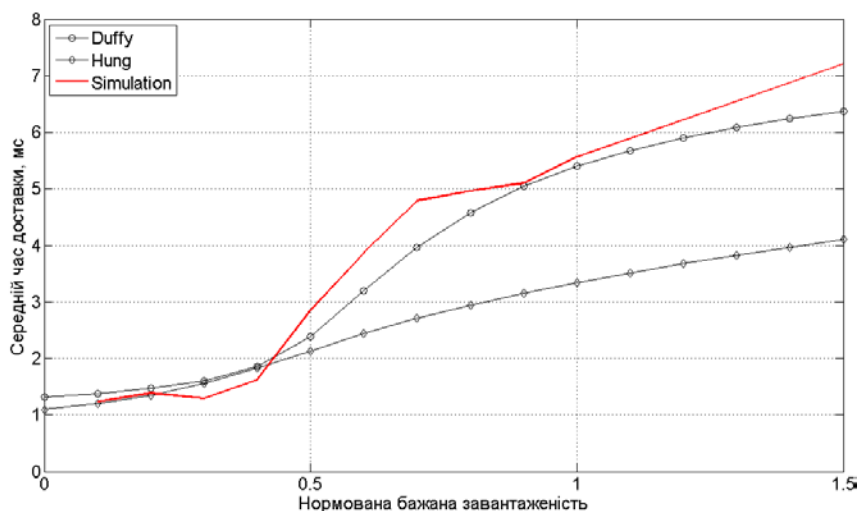


Рисунок 2.15 – Середній час доставки кадрів в мережі зі змінною завантаженістю при механізмі доступу до фізичного середовища DCF

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 2.15 результати імітаційного моделювання для середнього часу доставки досить добре узгоджуються з 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 2.16 та 2.17. 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 [62], внаслідок якої перехід мережі з ненасиченого стану в насичений відбувається досить різко.

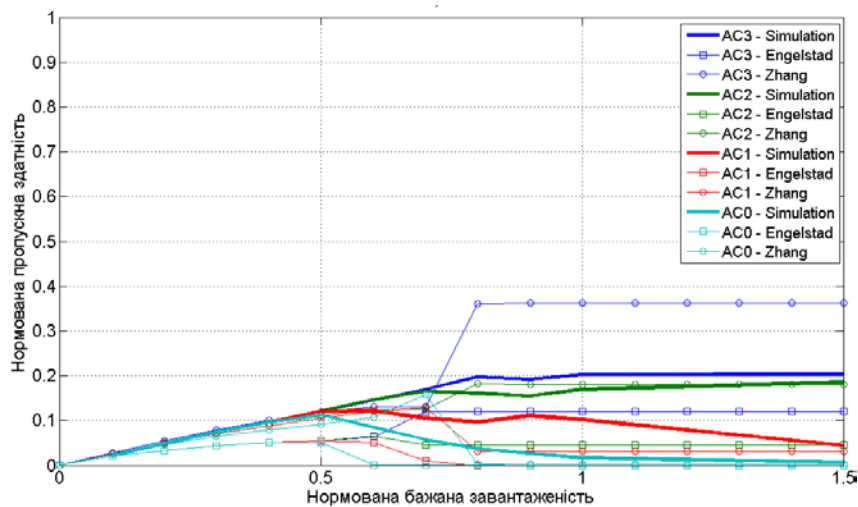


Рисунок 2.16 – Нормована пропускна здатність мережі зі змінною завантаженістю при механізмі доступу до фізичного середовища EDCA

Аналітичні моделі Жанга [94] та Енгельштада [60] дають досить різні результати, так пропускна здатність моделі Енгельштада для класів доступу AC2 та AC3 майже в три рази нижча, ніж для моделі Жанга. Така різниця, швидше за все, спричинена різним підходом до реалізації механізму доступу EDCA в аналітичній моделі. Подібна різниця в результатах моделювання спостерігається і для середнього часу доставки кадру (рисунок 2.17). Результати імітаційного моделювання лежать в межах розкиду значень результатів аналітичного моделювання.

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 2.17 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.

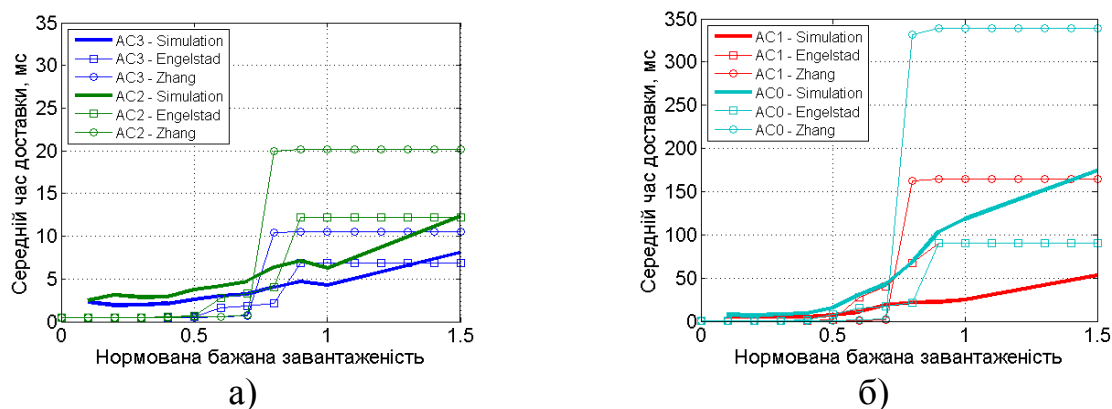


Рисунок 2.17 – Середній час доставки кадрів в мережі зі змінною навантаженістю при механізмі доступу до фізичного середовища EDCA

Таким чином, можна зробити висновок, що для навантаженості мережі до 50% ефективність роботи механізму доступу EDCA малопомітна, оскільки мережа повністю справляється зі згенерованим трафіком станцій. Проте для високої навантаженості 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 2.18).

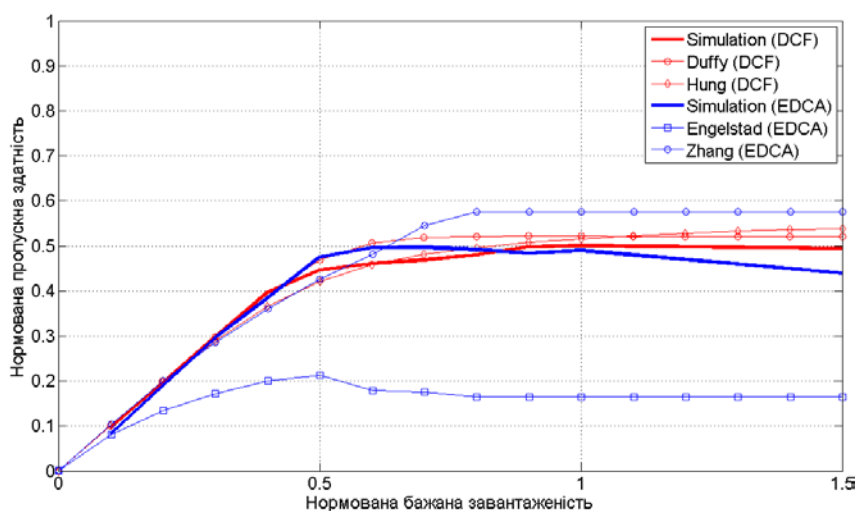


Рисунок 2.18 – Загальна нормована пропускну здатність у випадку змінної навантаженості

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 [95].

#### 2.4.2. Верифікація за допомогою симулятора NS-2

Симулятора NS-2 було обрано для порівняння з результатами роботи розробленої імітаційної моделі MAC-підрівня, оскільки в наукових роботах найбільш широко представлені результати моделювання роботи безпроводної мережі за його допомогою.

Найбільш вивченим та досліджуваним є стандарт безпроводної мережі 802.11b [60], параметри фізичного та MAC-рівнів для якого наведені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4.

Параметри MAC та фізичного рівнів стандарту 802.11b

MAC-заголовок	34 байта
PHY-заголовок	192 мкс
ACK	14 байт
Розмір слоту	20 мкс
SIFS	10 мкс
DIFS	50 мкс
$CW_{min}$	31
$CW_{max}$	1023
Число повторних передач кадру	7
Затримка розповсюдження сигналу	1 мкс

#### *Мережа з насиченою завантаженістю*

Для верифікації результатів роботи імітаційної моделі MAC-підрівня згідно базової схеми доступу були взяті результати моделювання насиченої безпроводної мережі за допомогою симулятора NS-2 наведені у роботі [96].

На рисунку 2.19 зображено результати моделювання для безпроводної мережі за допомогою імітаційної моделі MAC-підрівня та симулятора NS-2 [96]. Швидкість передачі в досліджуваній безпроводній мережі становить 1 Мбіт/с, а розмір кадру – 512 байт.

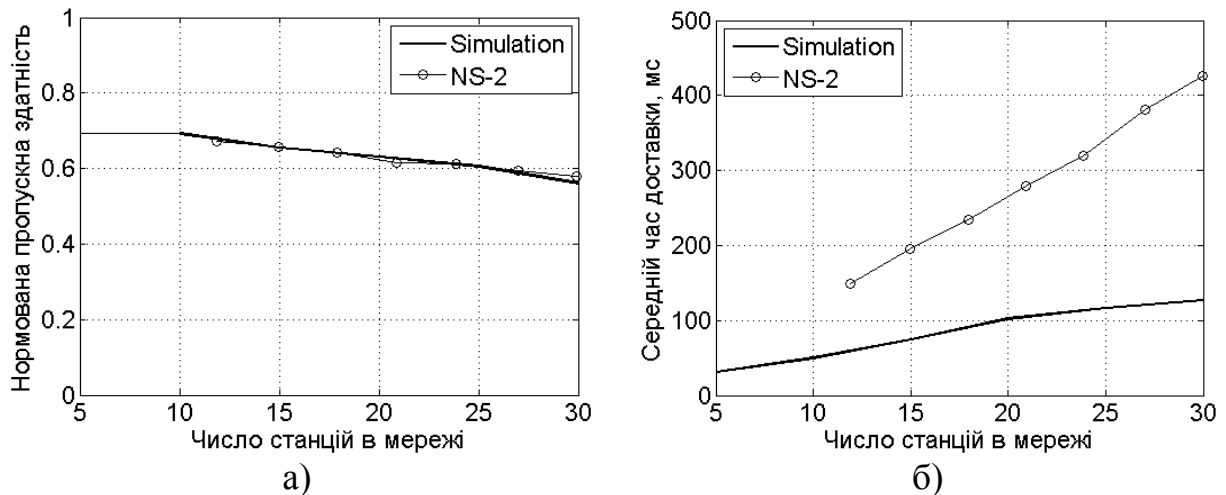


Рисунок 2.19 – Нормована пропускна здатність мережі в насиченому режимі та середній час доставки кадру при механізмі доступу до фізичного середовища DCF

Різниця між результатами для пропускної здатності зі зміною числа станцій в мережі не перевищує 2 % (рисунок 2.19а), тоді як середній час доставки кадру для імітаційної моделі щонайменше в два рази відрізняється від середнього часу доставки в симуляторі NS-2 (рисунок 2.19б). Проте для обох моделей за умови насиченості зі зростанням числа станцій в мережі лінійно зростає середній час необхідний для доставки кадру. Зважаючи на те, що результати імітаційної моделі добре узгоджувались з результатами аналітичних моделей, можна припустити, що при моделюванні за допомогою симулятора NS-2 враховуються додаткові часові затримки, спричинені іншими рівнями моделі OSI.

На рисунку 2.20 зображено залежність пропускної здатності для насиченої безпроводної мережі, яка функціонує згідно пріоритетної схеми доступу EDCA. При дослідженні швидкість передачі в мережі становила 11 Мбіт/с, а розмір кадру – 800 байт [97].

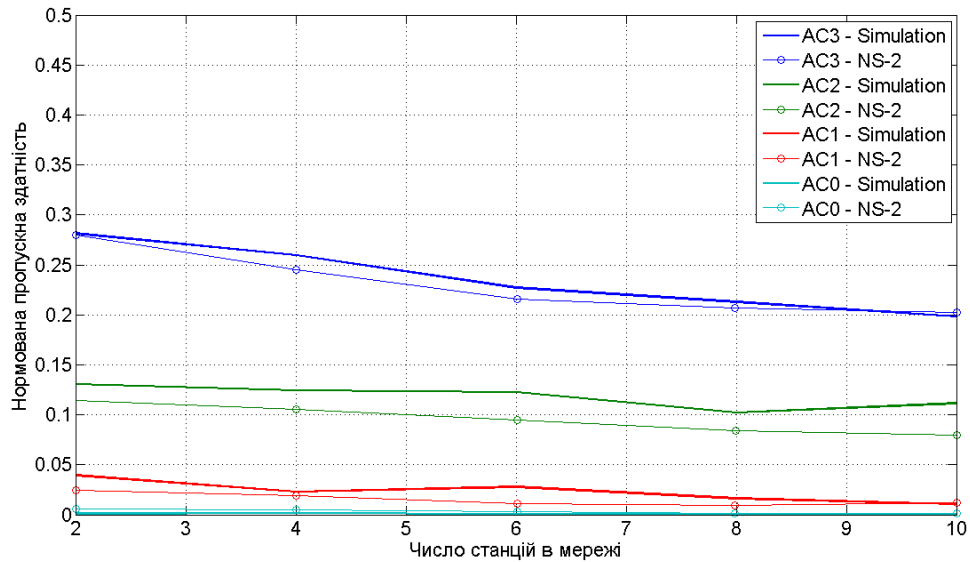


Рисунок 2.20 – Нормована пропускна здатність мережі в насиченому режимі при механізмі доступу до фізичного середовища EDCA

Результати моделювання імітаційної моделі добре узгоджуються з результатами симулятора NS-2. Для усіх чотирьох класів доступу пропускна здатність мережі зменшується з ростом числа станцій. За рахунок пріоритетної передачі кадрів вищих класів доступу, пропускна здатність кадрів нижчих класів доступу AC0 та AC1 в сукупності не перевищує 2-5 % від швидкості передачі, при цьому середній час очікування в рази більший, ніж для кадрів вищих класів доступу AC2 та AC3 (рисунок 2.21).

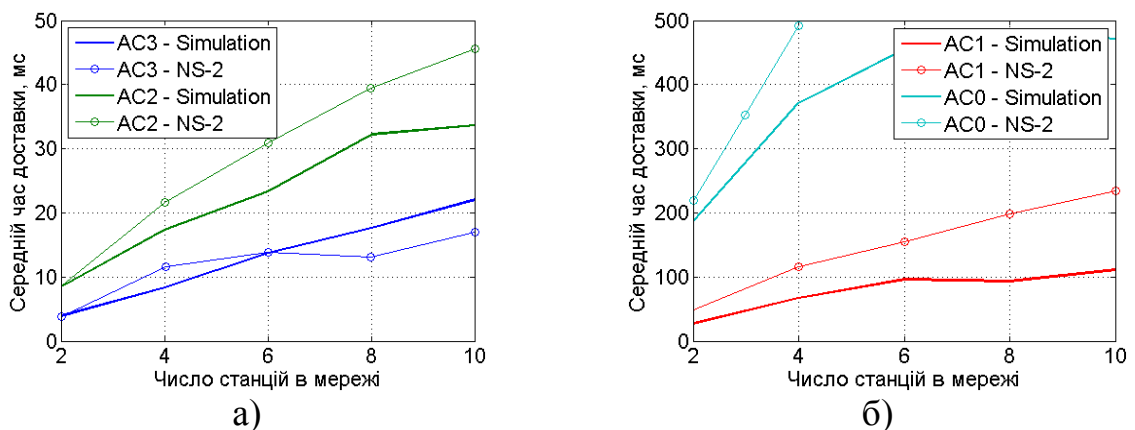


Рисунок 2.21 – Середній час доставки кадрів в мережі з насиченою завантаженістю при механізмі доступу до фізичного середовища EDCA

Аналогічно як і в попередньому сценарії середній час доставки в симуляторі NS-2 вищий, ніж в імітаційній моделі. Найбільший розкид значень спостерігається для великого числа станцій в мережі.

### *Мережа зі змінною завантаженістю*

Для верифікації імітаційної моделі MAC-підрівня безпроводної мережі зі змінною завантаженістю було використано сценарій роботи безпроводної мережі, досліджуваний за допомогою симулятора NS-2 в роботі [50]. Безпроводна мережа складалась з 16 станцій, які обслуговувала одна точка доступу. Кожна станція передавала кадри розміром 250 байт зі швидкістю 1 Мбіт/с. Результати моделювання зображені на рисунку 2.22.

Безпроводна мережа практично повністю справляється з трафіком, якщо її завантаженість не перевищує 60-65 % (рисунок 2.22а). При більших завантаженостях мережа переходить в насичений стан. Саме для перехідних завантаженостей спостерігається різниця між результатами, яка становить лише 10-12 %. Для середнього часу доставки (рисунок 2.22б) при завантаженостях до 70 % результати двох моделей цілком добре узгоджуються, при переході в насичений стан різниця між результатами зростає, що також спостерігалось в попередніх експериментах.

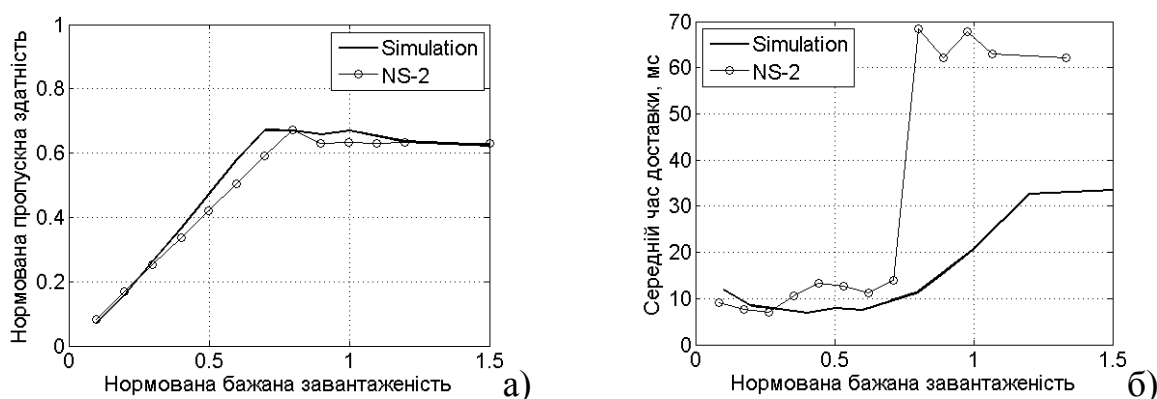


Рисунок 2.22 – Нормована пропускна здатність мережі зі змінною завантаженістю (а) та середній час доставки кадру (б) при механізмі доступу до фізичного середовища DCF



Для мережі зі схемою доступу EDCA обрано конфігурацію [97], яка передбачала наявність чотирьох станцій та точки доступу, розмір кадру становив 800 байт, які передавались зі швидкістю 11 Мбіт/с.

На рисунку 2.23 зображено пропускну здатність мережі в залежності від її завантаженості. Безпроводна мережа завантажена до 40 %, згідно результатів імітаційної моделі, повністю справляється з трафіком. Натомість, згідно результатів симулятора NS-2, її сумарна пропускна здатність не перевищує 15 % від швидкості передачі; в той же час, при завантаженості більше 50 %, пропускна здатність мережі досить стрімко зростає. Оскільки мережа з низькою завантаженістю зазвичай повністю справляється з трафіком, що було показано на прикладі аналітичних та імітаційних моделей для інших конфігурацій безпроводної мережі, можна припустити, що авторами роботи [97] внесено неточності при обробці результатів симулятора NS-2.

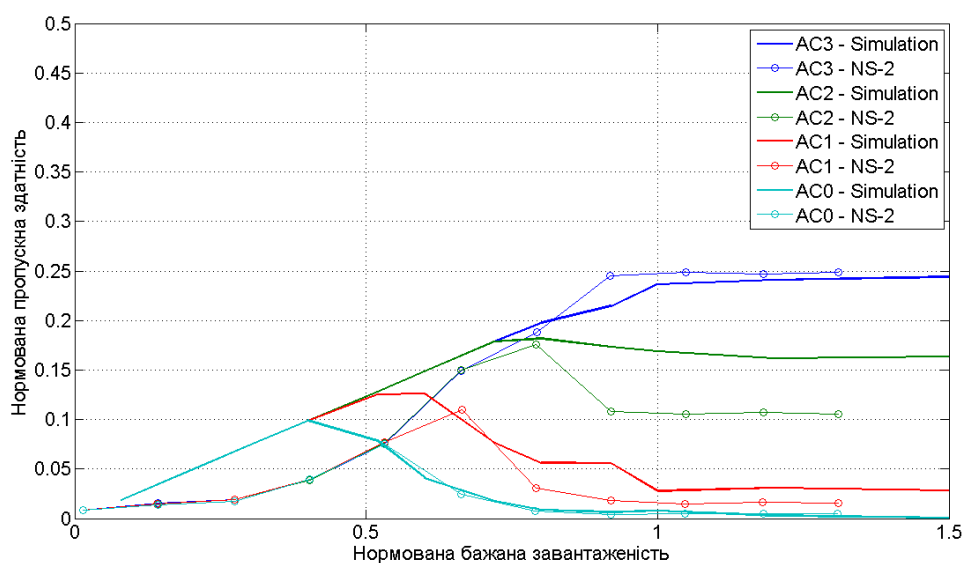


Рисунок 2.23 – Нормована пропускна здатність мережі зі змінною завантаженістю при механізмі доступу до фізичного середовища EDCA

Середній час доставки кадру в мережі в залежності від її завантаженості для даного експерименту зображено на рисунку 2.24. Як і для мережі, яка працює згідно базової схеми доступу DCF, результати її

моделювання у ненасиченому стані добре між собою узгоджуються, при переході в насичений стан середній час доставки кадру для симулятора NS-2 значно зростає в порівнянні з імітаційною моделлю. Оскільки подібна різниця в насиченому стані спостерігалась для усіх проведених експериментів, можна припустити, що в симуляторі NS-2 до середнього часу доставки на MAC-підрівні додаються часові затримки, внесені іншими рівнями моделі OSI.

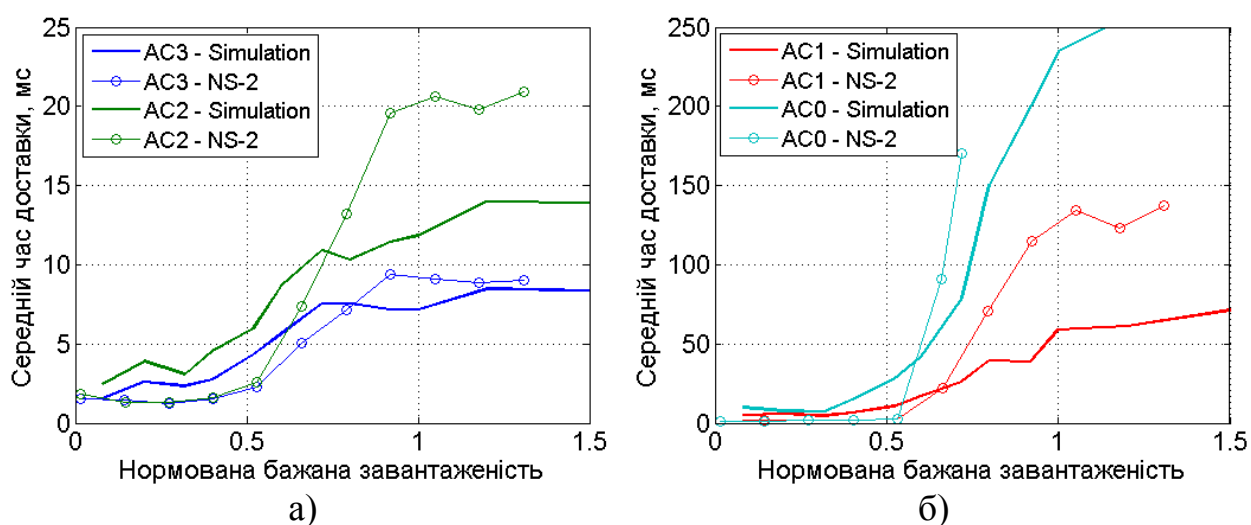


Рисунок 2.24 – Середній час доставки кадрів в мережі зі змінною завантаженістю при механізмі доступу до фізичного середовища EDCA для а) високопріоритетних та б) низькопріоритетних класів доступу

### 2.4.3. Верифікація за допомогою фізичних експериментів

Однією з задач верифікації роботи імітаційної моделі MAC-підрівня є порівняння її результатів роботи з результатами фізичних експериментів.

В більшості аналітичних та імітаційних моделей припущено, що фізичне середовище ідеальне, тобто згасання сигналу, інтерференція сигналів та їх дифракція на шляху від передавача до приймача нехтуються. Проте фізичні експерименти показують, що вже на відстані близько 50 метрів від передавача пропускна здатність не перевищує 10 % від швидкості передачі [98, 99].

При розробці імітаційної моделі було реалізовано модель фізичного середовища, для якого втрата потужності сигналу з відстанню обчислюється згідно формули (2.15). В залежності від потужності сигналу обирається максимально можлива швидкість передачі згідно таблиці 2.1.

В експерименті, проведеному в роботі [98], досліджувалась максимально можлива пропускна здатність в залежності від відстані між точкою доступу та станцією. Точка доступу функціонувала згідно стандарту 802.11g та надсилала неперервний потік кадрів розміром 1500 байт зі швидкістю 54 Мбіт/с. Відстань між точкою доступу та станцією змінювалась від 9 до 60 метрів. Виміри проводились у приміщенні та з використанням обладнання різних виробників.

На рисунку 2.25 зображено результати імітаційного моделювання та результати фізичних експериментів для обладнання різних виробників [98].

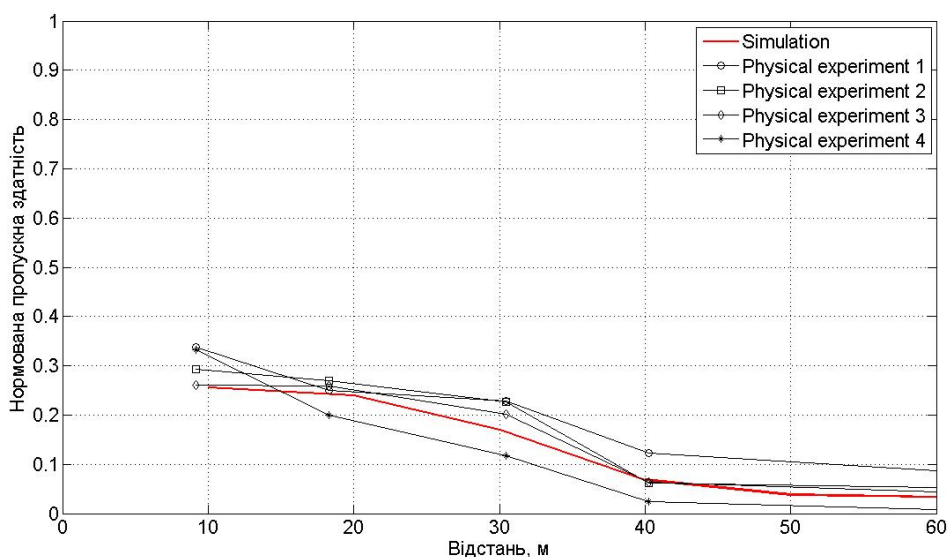


Рисунок 2.25 – Зміна нормованої пропускну здатності мережі стандарту 802.11g з відстанню

Як бачимо, пропускна здатність мережі навіть в найкращому випадку, в безпосередній близькості від точки доступу, становить лише 25-30 % від швидкості передачі, тобто близько 15 Мбіт/с. В радіусі 30 м від точки доступу пропускна здатність мережі зберігається на рівні 20-25 %. При

збільшенні відстані до 40 м пропускна здатність мережі різко падає до 10 % ( $\approx 6$  Мбіт/с), а на відстані 60 м – не перевищує 5 % ( $\approx 3$  Мбіт/с).

Результати імітаційного моделювання добре узгоджуються з фізичними вимірюваннями, різниця між ними не перевищує 12 %, при цьому між вимірюваннями, зробленими за допомогою обладнання різних виробників, існує суттєвий розкид значень.

Аналогічний фізичний експеримент було проведено і для обладнання, яке працює згідно стандарту 802.11n [99]. Конфігурація експерименту передбачала три станції та точку доступу. Дві станції були підключені до точки доступу за допомогою Ethernet з'єднання, третя станція з'єднувалась з точкою доступу за допомогою безпроводного середовища. Станції обмінювались між собою потоком кадрів розміром 1500 байт при швидкості передачі 300 Мбіт/с. Результати експериментів для обладнання різних виробників та імітаційного моделювання зображено на рисунку 2.26.

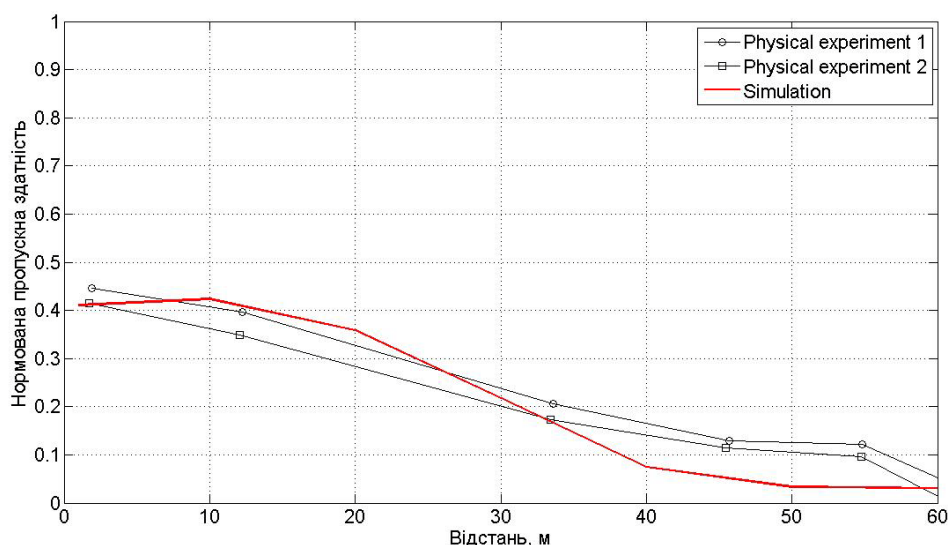


Рисунок 2.26 – Зміна нормованої пропускної здатності мережі стандарту 802.11n з відстанню

Як і для мереж стандарту 802.11g пропускна здатність мережі зменшується з відстанню; якщо на відстані до 20 м пропускна здатність сягає 40 % (120 Мбіт/с), то на відстані 60 м – лише 5 % (15 Мбіт/с).

Порівнюючи результати моделювання зміни пропускної здатності в залежності від відстані для стандартів 802.11g та 802.11n видно, що, пропускна здатність безпроводної мережі не перевищує 35-45 % від швидкості передачі. Причиною цього є неефективність протоколу управління доступом до середовища безпроводної мережі на MAC-підрівні.

Оскільки в стандарті 802.11n на MAC-підрівні передбачено механізм забезпечення якості обслуговування QoS, в роботі [99] було проведено експеримент для демонстрації пріоритетної передачі трафіку з високим класом доступу. Згідно експерименту, дві станції, з'єднані з точкою доступу за допомогою Ethernet з'єднання, надсилали два потоки трафіку, які були адресовані третій станції, з'єднаній з точкою доступу безпроводним каналом та розташованій на відстані 33.5 м від неї. Один з потоків трафіку був мультимедійним, для відтворення сценарію перегляду потокового відео користувачем, інший – фоновий трафік з найнижчим класом доступу. Результати експерименту та імітаційної моделі зображено на рисунку 2.27.

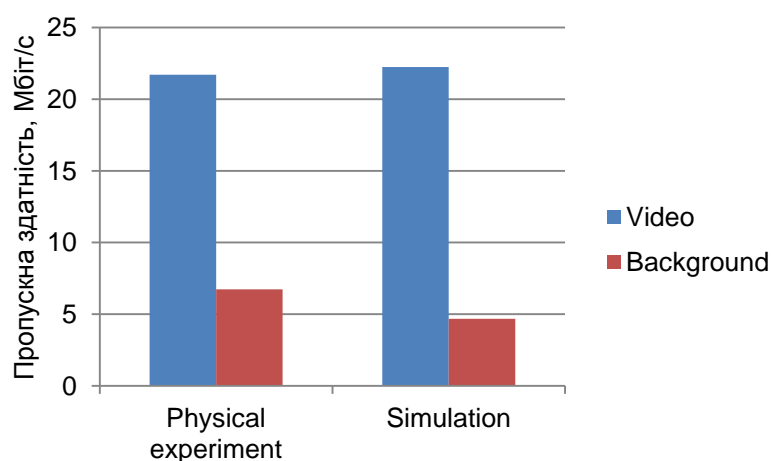


Рисунок 2.27 – Пропускна здатність мережі стандарту 802.11n для двох класів трафіку

Забезпечення пріоритетної передачі відео перед фоновим трафіком є ключовою функцією безпроводного обладнання, оскільки якість відео прямо залежить від наявної пропускної здатності. Так, для прикладу, при передачі

відео-поток у форматі MPEG-2 HDTV з прогресивною розгорткою 1080 та частотою оновлення 30 кадрів на секунду необхідно забезпечити пропускну здатність на рівні 20 Мбіт/с для хорошої якості відео [99]. Завдяки реалізованому механізму забезпечення якості обслуговування QoS, згідно результатів експерименту та імітаційної моделі (рисунок 2.27), пропускну здатність мережі для відео-трафіку на відстані 33.5 м від точки доступу становить близько 21 Мбіт/с, що майже в чотири рази перевищує пропускну здатність фонового трафіку. Різниця між результатами імітаційного моделювання та фізичного експерименту є невеликою – 0.5 Мбіт/с для відео-поток, та 2 Мбіт/с для фонового трафіку.

Порівняння результатів імітаційного моделювання з даними фізичних експериментів показало, що прийняті припущення при розробці імітаційної моделі щодо втрати потужності сигналу з відстанню не вносять суттєвих розбіжностей в результати імітаційного моделювання. При цьому в ідеальних умовах (невелике число станцій в мережі та їх розміщення поблизу точки доступу) і для стандарту 802.11g, і для стандарту 802.11n пропускну здатність не перевищує 35-45 % від швидкості передачі. Таким чином, крім вдосконалення технології передачі сигналів на фізичному рівні, необхідно приділити увагу підвищенню ефективності роботи безпроводної мережі і на вищих рівнях моделі OSI, зокрема і на MAC-підрівні, на якому реалізовано механізм доступу до фізичного середовища.

## 2.5. Висновки до розділу

1. На основі проведеного системного аналізу розроблено імітаційну модель MAC-підрівня безпроводної мережі, в якій реалізовано підтримку режимів роботи згідно специфікацій стандарту 802.11g/n, змінну завантаженість станцій, присутність шуму в каналі, згасання сигналу з відстанню і, як наслідок, зниження пропускну здатності.

2. Застосований при розробці імітаційної моделі об'єктно-орієнтований підхід дозволяє розширити реалізовані за замовчуванням особливості функціонування імітаційної моделі МАС-підрівня.
3. В імітаційній моделі МАС-підрівня реалізовано режим Infrastructure Mode, який дає змогу моделювати та аналізувати розгалужені безпроводні мережі, які складаються з набору сегментів, де між собою сегменти зв'язуються за допомогою точок доступу.
4. На відміну від переважної більшості аналітичних моделей, в яких трафік розподіляється рівномірно між станціями, в імітаційній моделі МАС-підрівня додатково реалізовано модель розподілу завантаженості між станціями як пуассонівський потік, згідно якого інтенсивність надходження кадрів в мережу для одних станцій може бути високою, для інших – низькою, при цьому величина інтенсивності змінюється з часом, що дозволяє максимально наближено до реальних умов відтворити потік трафіку в мережі.
5. Реалізована за замовчуванням модель шуму та згасання сигналу в навколишньому середовищі дозволяє моделювати та аналізувати роботу безпроводної мережі наближену до реальних умов, де численні завади та шум на шляху сигналу суттєво знижують швидкість передачі та, як наслідок, пропускну здатність безпроводної мережі.
6. Розроблена імітаційна модель МАС-підрівня добре узгоджується з аналітичними моделями та симулятором NS-2, різниця результатів моделювання знаходиться в межах 5-12 %, що є достатнім [95].
7. Порівняно з аналітичним моделюванням розроблена імітаційна модель МАС-підрівня дозволяє ширше дослідити різноманітні залежності параметрів безпроводної мережі, вплив на них зміни схеми функціонування безпроводної мережі, а значить, розробити та перевірити нові адаптивні алгоритми керування трафіком на МАС-підрівні.

8. Аналіз результатів моделювання роботи MAC-підрівня мережі з різними конфігураціями показав, що сумарна пропускна здатність безпроводної мережі згідно схеми доступу EDCA нижча, ніж згідно схеми доступу DCF. При цьому чим більше станцій в безпроводній мережі, тим меншу пропускну здатність забезпечує схема доступу EDCA в насиченому режимі в порівнянні зі схемою доступу DCF.
9. Порівнюючи результати роботи розробленої імітаційної моделі MAC-підрівня з даними фізичних експериментів, було продемонстровано, що розроблена в імітаційній моделі спрощена модель фізичного рівня не вносить суттєвих розбіжностей в результати імітаційного моделювання. Різниця між результатами імітаційного моделювання та результатами фізичних експериментів не перевищує 12 %, при цьому розкид значень між вимірюваннями, зроблених за допомогою обладнання різних виробників, досягає 32-50 %.
10. Порівняння результатів імітаційного моделювання для стандартів 802.11g та 802.11n показало, що навіть за ідеальних умов (невелике число станцій в мережі та близьке їх розміщення до точки доступу) пропускна здатність не перевищує 35-45 %. Таким чином, крім вдосконалення технології передачі сигналів на фізичному рівні, необхідно приділити увагу підвищенню ефективності роботи безпроводної мережі і на вищих рівнях моделі OSI, зокрема на MAC-підрівні, на якому реалізовано механізм доступу до фізичного середовища.
11. Було показано, що внаслідок часових затримок через необхідність прослуховування каналу, передачі службових повідомлень, очікування станціями випадкового часу при вирішенні конфліктів протокол управління доступом до середовища на MAC-підрівні не дозволяє отримати суттєвий приріст пропускну здатності навіть при використанні найефективніших технологій фізичного рівня. Таким



чином, протокол управління доступом до середовища на MAC-підрівні стає вузьким місцем на шляху розвитку безпроводних мережевих технологій. Саме тому розробка алгоритму ефективного використання безпроводного каналу є надзвичайно актуальною проблемою на сьогодні.

Результати даного розділу опубліковані у роботах [76, 79, 89, 90, 91, 92, 93, 100, 101].

## Розділ 3

### Дослідження продуктивності роботи MAC-підрівня безпроводної мережі

У третьому розділі проведено детальний аналіз залежностей зміни характеристик безпроводної мережі при зміні числа категорій доступу, а також за різних умов функціонування мережі. Проведено дослідження ефективності роботи схеми доступу EDCA для різного співвідношення трафіків класів QoS. Також проведено аналіз забезпечення схемою EDCA якості передачі високопріоритетного трафіку.

#### 3.1. Дослідження загальної пропускної здатності безпроводної мережі

Як було показано у п. 2.4.1 сумарна пропускна здатність насиченої безпроводної 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 безпроводної мережі за різної завантаженості, та вплив на них застосування схеми доступу EDCA з різним числом категорій доступу.

При моделюванні роботи MAC-підрівня безпроводної 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 2.3. Припустимо, що в безпроводній 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
RHY-заголовок	32 байта
ACK	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 фонового 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.

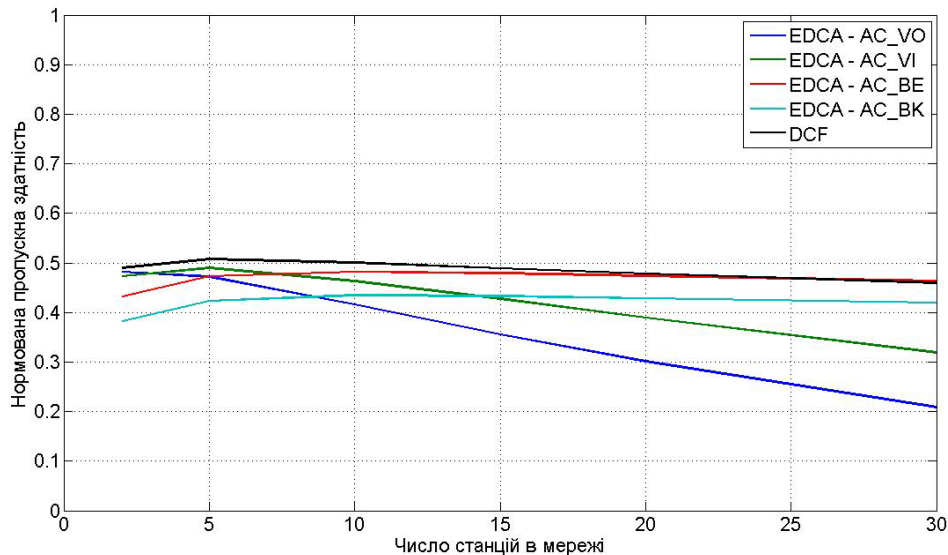


Рисунок 3.1 – Нормована пропускна здатність безпроводної мережі, яка передає один тип трафіку

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 2.3). Для третьої схеми трафік поділявся на чотири категорії доступу, згідно стандарту 802.11e (таблиця 2.3). 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	AC0	AC1	AC0	AC1	AC2	AC3	AC0,1	AC2,3	AC4,5	AC6,7
<b>CWmin</b>	31	31	15	31	31	15	7	31	31	15	7
<b>CWmax</b>	1023	1023	31	1023	1023	31	15	1023	1023	31	15
<b>AIFS (мкс)</b>	50	150	50	150	70	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 Ксяо [10] та Енгельштада [60].

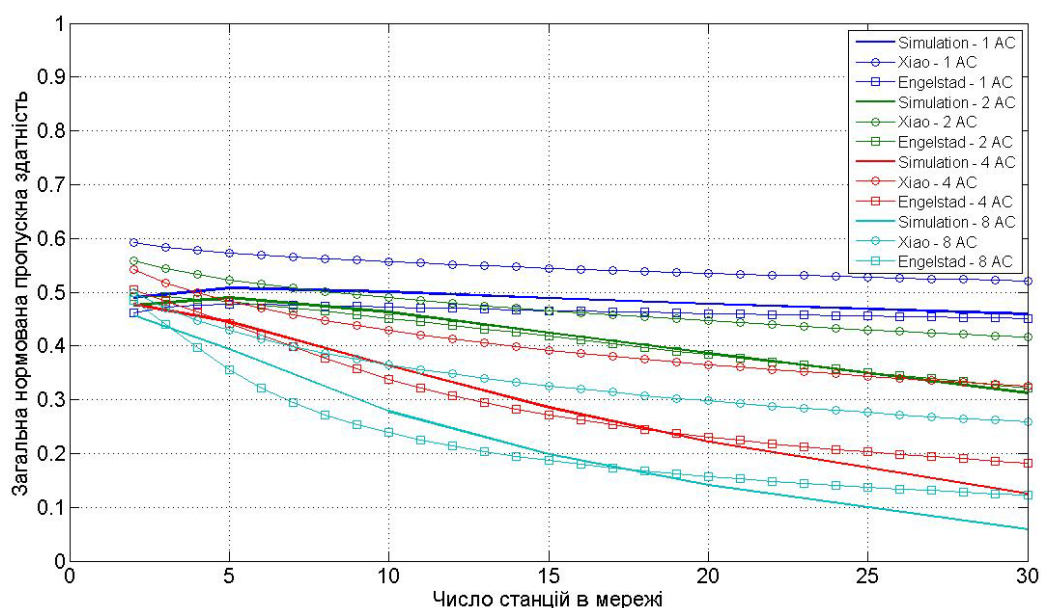
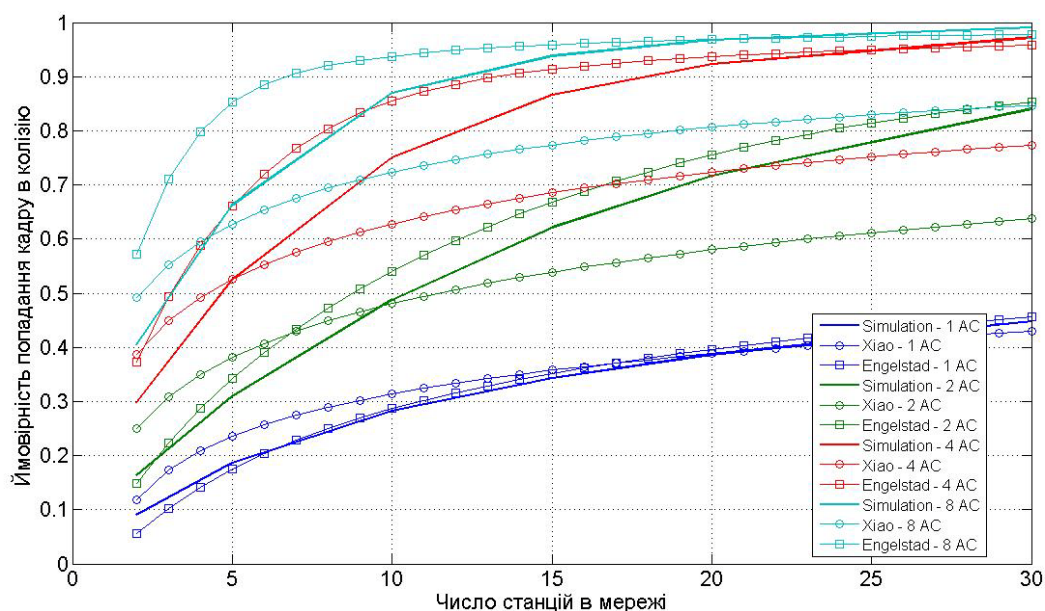


Рисунок 3.2 – Загальна нормована пропускну здатність для чотирьох схем доступу

Для усіх трьох моделей пропускну здатність падає зі збільшенням числа станцій в мережі. Для невеликого числа станцій в мережі загальна нормована пропускну 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 від числа станцій в мережі.



Рисунк 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%.

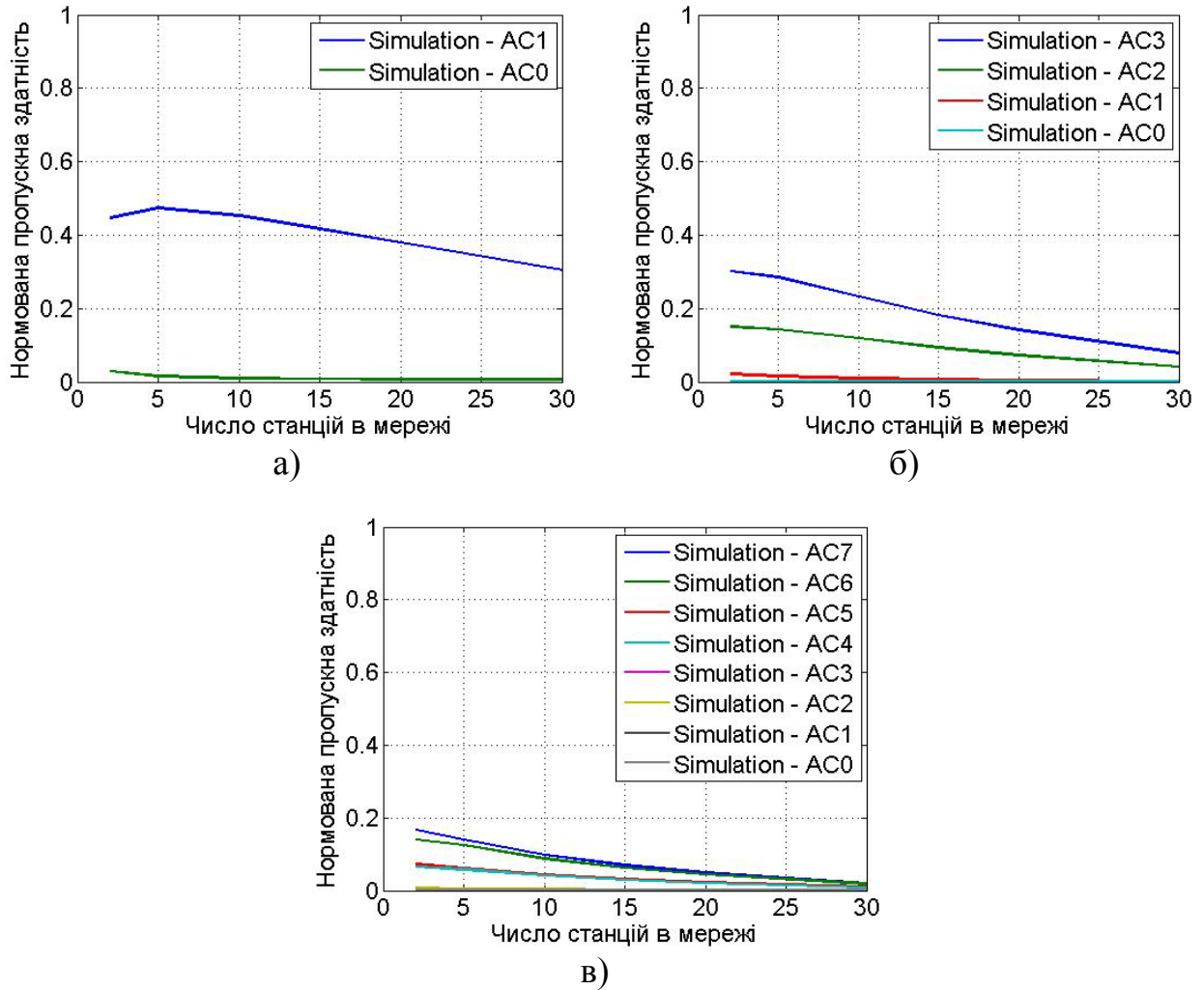


Рисунок 3.4 – Нормована пропускна здатність для схем поділу трафіку на а) дві, б) чотири та в) вісім категорій доступу

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

На рисунку 3.5 зображено зміну загальної нормованої пропускну 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 [27], для діапазону значень завантаженості 10-40% пропускну здатність, обчислена за аналітичною моделлю, переважає завантаженість мережі на  $\approx 0.07$ , 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 безпроводної мережі на всьому діапазоні змін завантаженості.

Як видно з рисунка 3.5, безпроводна мережа майже у всіх випадках повністю справляється з завантаженістю до 40%, тобто для усіх чотирьох схем доступу загальна пропускну здатність безпроводної мережі близька до її завантаженості, лише для мережі з 30 станцій для схем з чотирма та вісьмома категоріями доступу безпроводна 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.

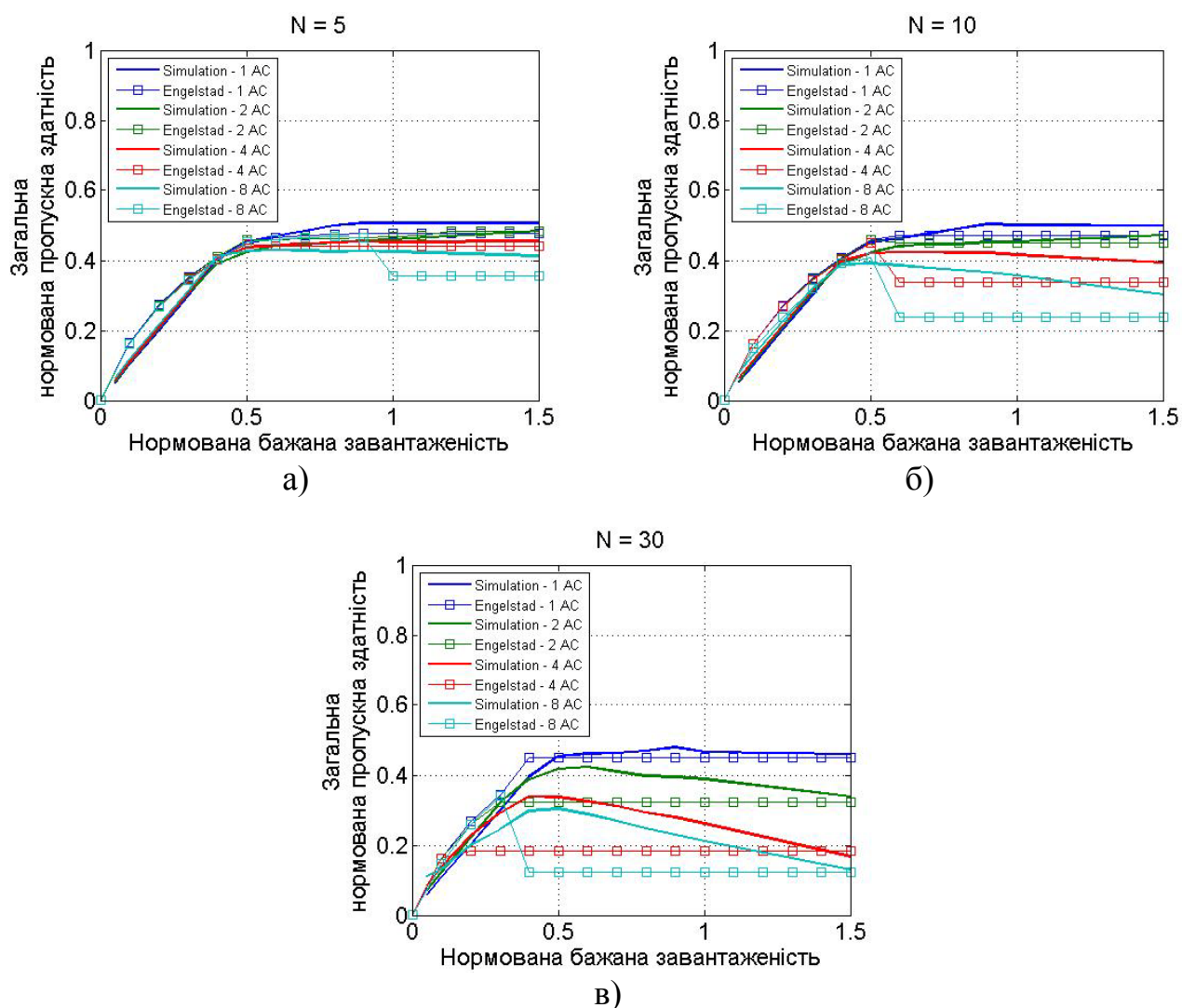


Рисунок 3.5 – Загальна нормована пропускна здатність для чотирьох схем доступу для безпроводної мережі, яка складається з а) 5, б) 10 та в) 30 станцій

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 безпроводних 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 безпроводна 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  $\approx 0.1$  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 безпроводна мережа все ще забезпечує пріоритетне право на передачу кадрів вищих категорій доступу, проте нормована пропускну здатність для них не перевищує значення  $\approx 0.1$ . 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.

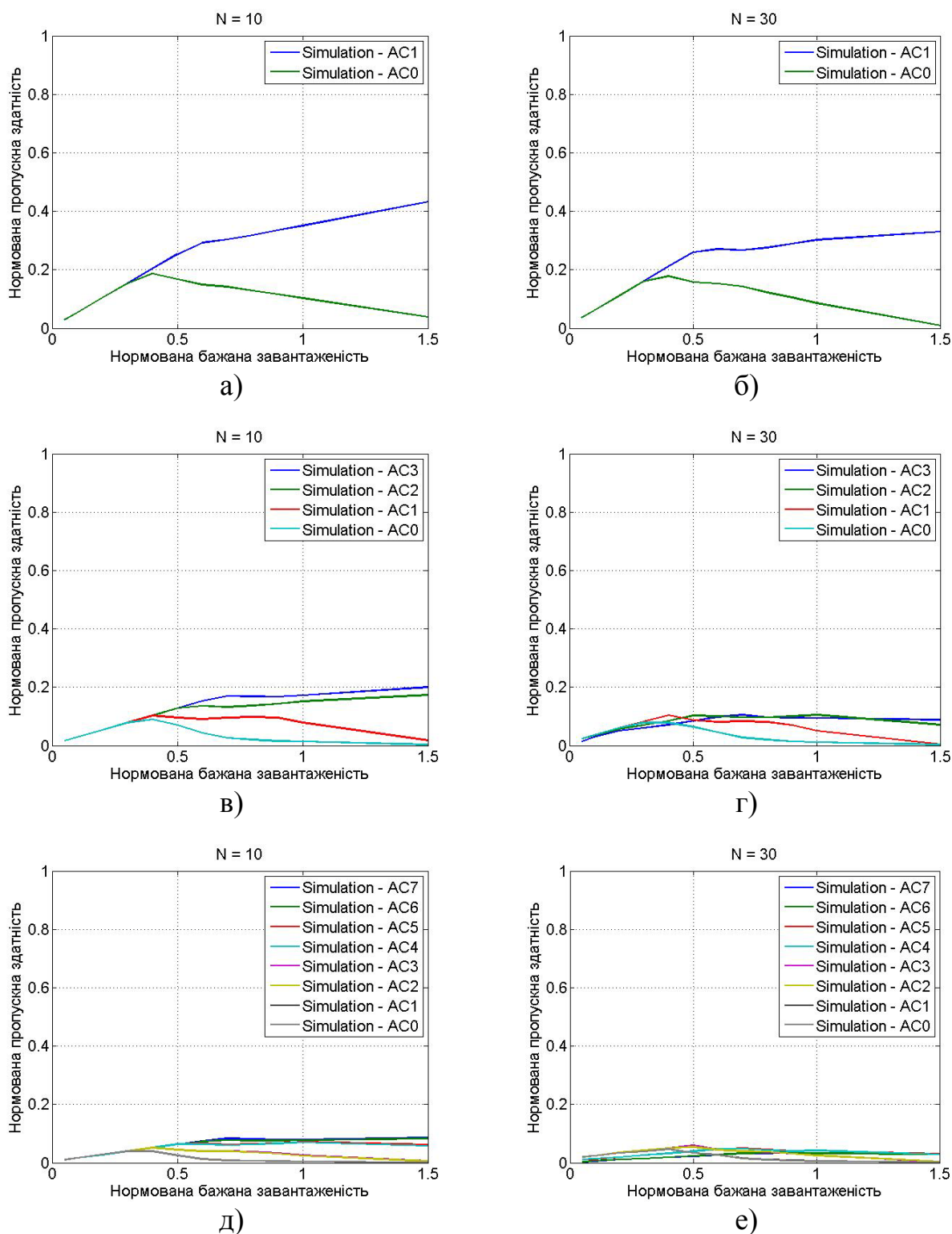


Рисунок 3.6 – Нормована пропускна здатність для схем поділу трафіку на а), б) дві в), г) чотири та д), е) вісім категорій доступу для 10 та 30 станцій відповідно

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 безпроводної 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 безпроводної 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 безпроводної 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,

безпроводна 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, безпроводна 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.

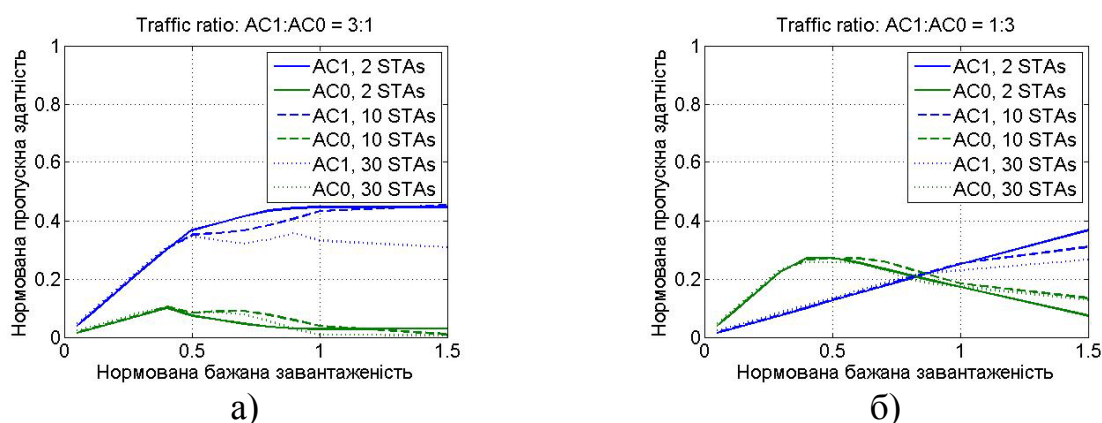


Рисунок 3.7 – Нормована пропускна здатність для схеми поділу трафіку на дві категорії доступу при співвідношенні трафіків згідно а) сценарію А та б) сценарію В для 2, 10 та 30 станцій в мережі

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 безпроводних 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 завантажених мереж. 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).

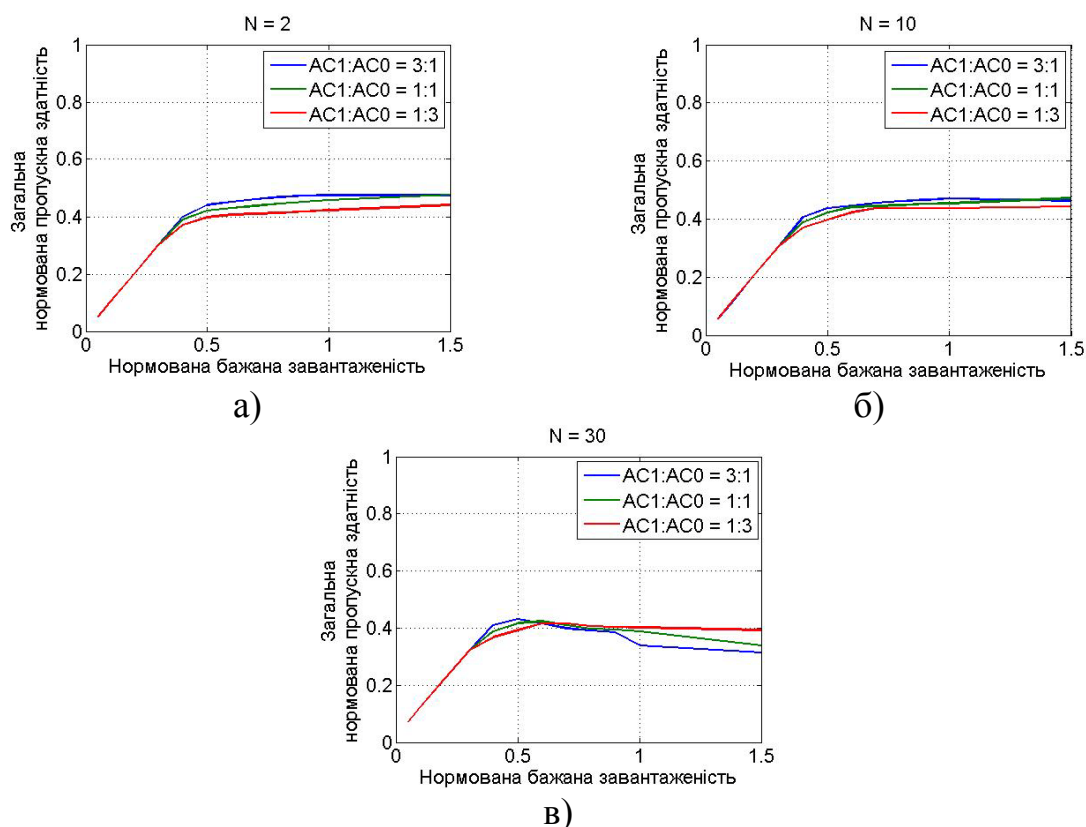


Рисунок 3.8 – Загальна нормована пропускну здатність для схеми поділу трафіку на дві категорії доступу при різному співвідношенні трафіків для а) 2, б) 10 та в) 30 станцій в мережі відповідно

Для безпроводної мережі середніх розмірів (рисунок 3.8б) зміна співвідношення високо- та низькопріоритетного трафіків практично не впливає на загальну пропускну здатність. Для безпроводної 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 пропускну здатність для схеми поділу трафіку на чотири категорії доступу при його співвідношенні згідно сценаріїв А та В зображена на рисунку 3.9.

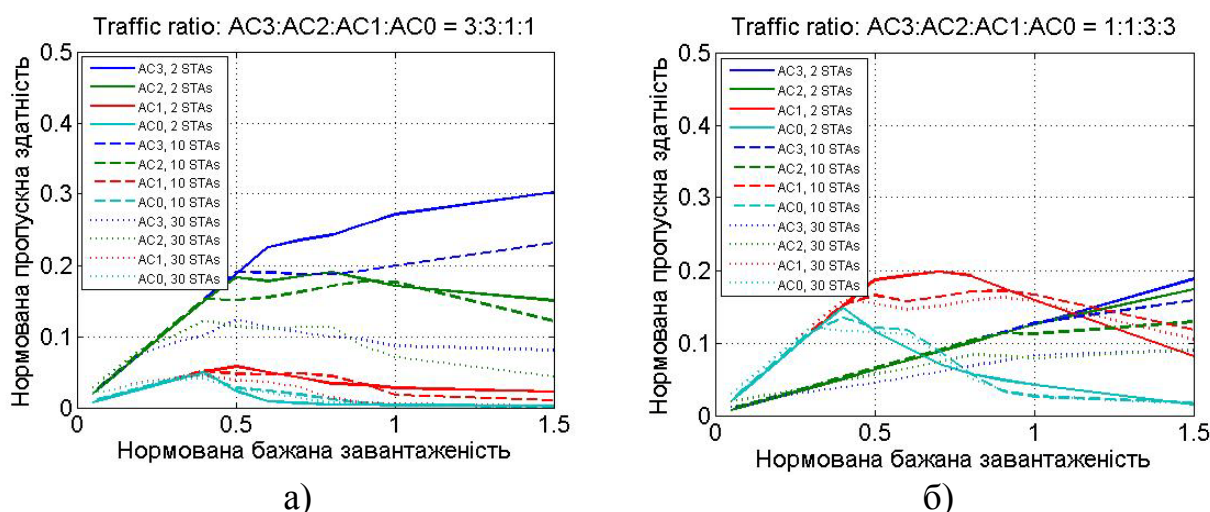


Рисунок 3.9 – Нормована пропускну здатність для схеми поділу трафіку на чотири категорії доступу при співвідношенні трафіків згідно а) сценарію А та б) сценарію В для 2, 10 та 30 станцій в мережі

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 пропускну 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 пропускною здатністю для трафіку АС3 та АС2, 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 кадрів категорії доступу АС1, 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 АС1 –  $43\%$ , а найнижчого АС0 – 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 пропускну 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 пропускну здатність мережі.

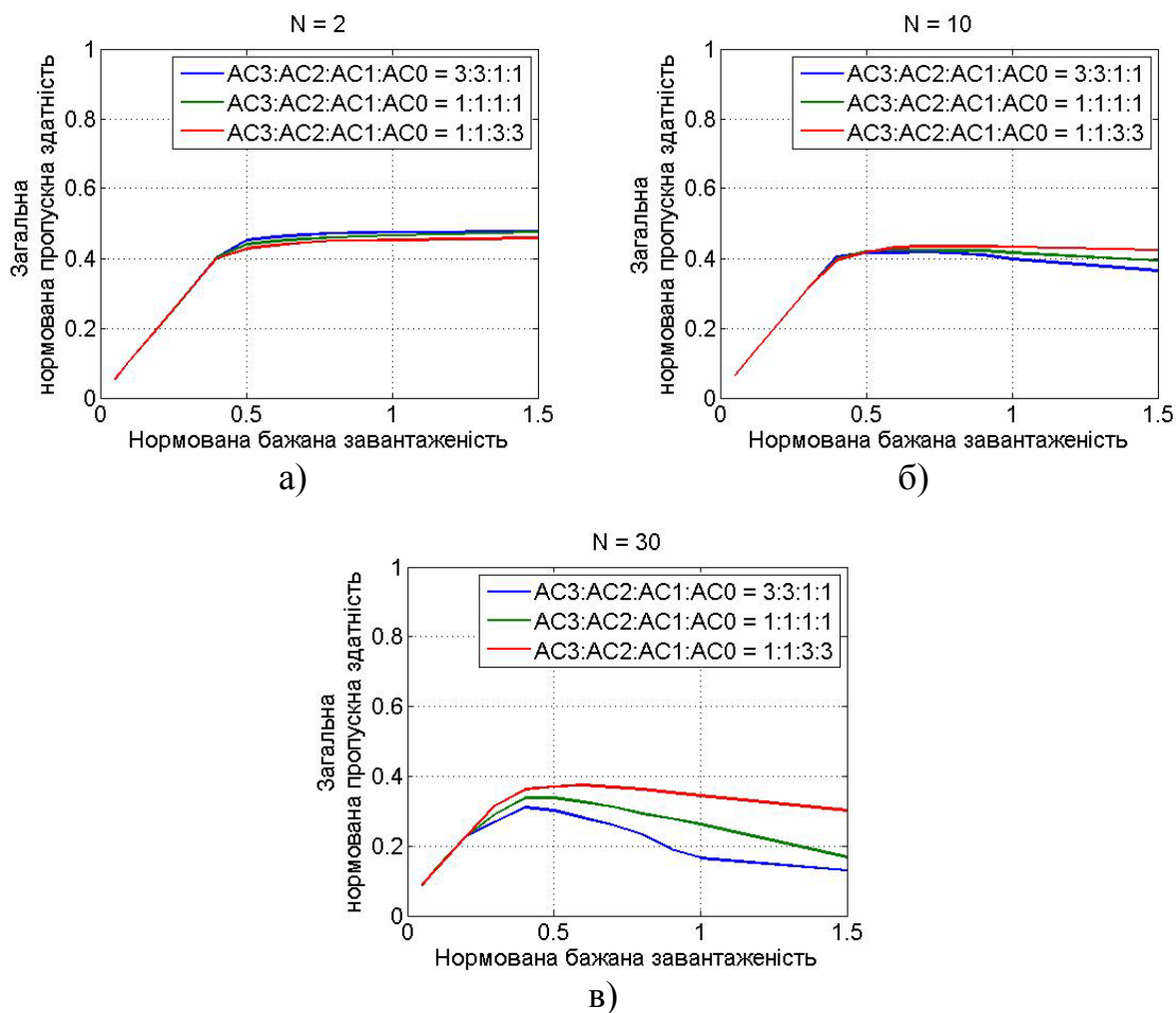


Рисунок 3.10 – Загальна нормована пропускна здатність для схеми поділу трафіку на чотири категорії доступу при різному співвідношенні трафіків для а) 2, б) 10 та в) 30 станцій в мережі відповідно

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 АС3 та АС2 не перевищує 0.13. Разом з тим для кадрів категорії доступу АС1 та АС0 (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 безпроводних мереж малого та середнього розміру. Для великих безпроводних мереж зростання частки високопріоритетного трафіку знижує загальну пропускну здатність мережі на 30-35%. Відзначимо також, що чим більше категорій доступу для великих безпроводних мереж, тим нижча загальна пропускна здатність (рисунок 3.8в та рисунок 3.10в).

### **3.3. Дослідження забезпечення безпроводною 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 безпроводну 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 пропускну 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 безпроводних 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 безпроводної мережі та затримку при передачі кадру для схем поділу трафіку на дві та чотири категорії доступу щодо забезпечення вимог високопріоритетного трафіку до якості передачі: пропускну 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 безпроводна 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 безпроводної 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 безпроводних мереж середнього та великого розміру, оскільки на продуктивність таких мереж суттєвий вплив має ймовірність одночасного доступу кількома станціями. Значення необхідної пропускної здатності для голосового та відео трафіку пронормовані по швидкості передачі 54 Мбіт/с та становлять відповідно  $3.7 \times 10^{-4}$  і  $1.85 \times 10^{-2}$ .

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.

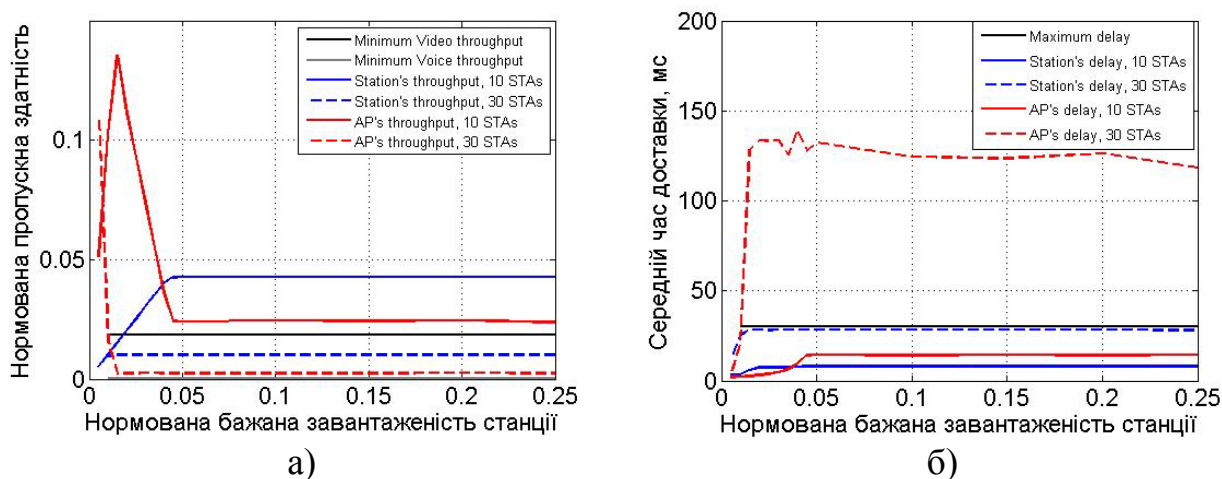


Рисунок 3.11 – Нормована пропускна здатність та середній час доставки кадру для високопріоритетного трафіку станції та точки доступу для схеми поділу трафіку на дві категорії доступу

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  $103.7 \cdot 10^{-3}$  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 безпроводної 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 безпроводної 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.

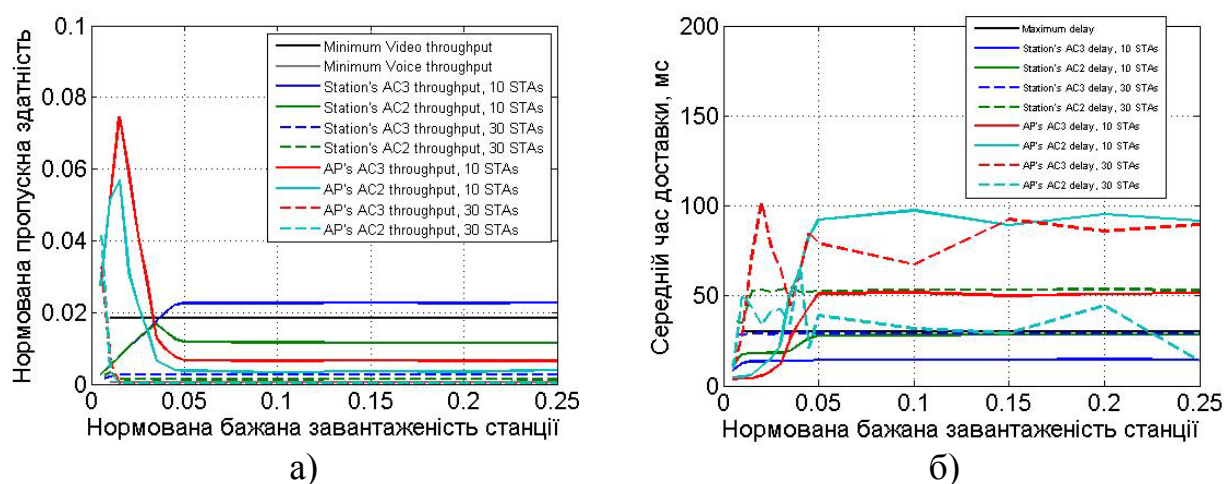


Рисунок 3.12 – Нормована пропускна здатність та середній час доставки кадру для високопріоритетного трафіку станції та точки доступу для схеми поділу трафіку на чотири категорії доступу

Для безпроводних 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  $3.7 \times 10^{-3}$  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  $\approx 50$  мс, а для точки доступу – 70-90 мс, і лише при завантаженості  $\leq 0.05$  середній час доставки для станції та точки доступу є нижчим, ніж 30 мс. Тобто, безпроводна 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 безпроводній 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 безпроводних 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.



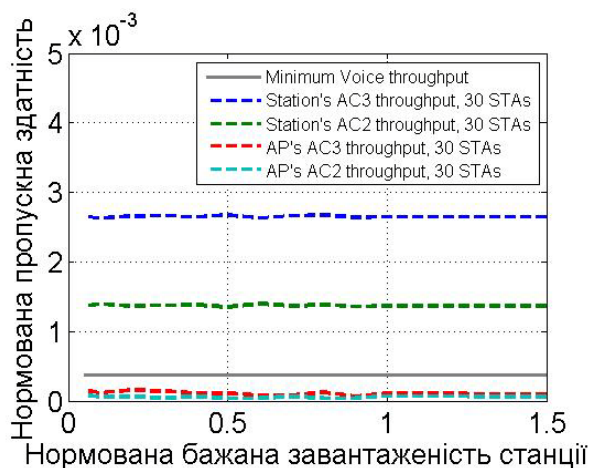


Рисунок 3.13 – Нормована пропускна здатність високопріоритетного трафіку станції та точки доступу безпроводної мережі великого розміру для схеми поділу трафіку на чотири категорії доступу

Підсумовуючи, відзначимо, що для безпроводної 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 безпроводних 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 безпроводній мережі 54 Мбіт/с, оскільки зниження або зростання швидкості передачі на фізичному рівні призведе, відповідно, до погіршення або

покращення таких характеристик як пропускна здатність та часова затримка передачі.

Результати проведеного дослідження показали доцільність та необхідність введення механізму управління підрівнем MAC для безпроводних мереж з метою підвищення ефективності роботи безпроводної мережі та забезпечення якості передачі високопріоритетного трафіку.

### 3.4. Висновки до розділу

1. При конкурентних способах доступу з недопущенням колізій зі збільшенням числа категорій доступу зменшується пропускна здатність безпроводної мережі згідно схеми EDCA як для окремої категорії доступу, так і сумарна. 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 безпроводної мережі.
2. Показано, що аналітичне моделювання є чутливим до прийнятих припущень при розробці. Так, модель Енгельштада [60] може застосовуватись при завантаженнях від 0.4, при менших завантаженнях модель незалежно від кількості станцій в мережі та числа категорій доступу дає некоректні результати, які в середньому на  $\approx 0.07$  вищі, ніж бажана завантаженість мережі.
3. Показано, що за умови насиченості та за наявності в мережі лише одного типу трафіку, особливо високопріоритетного, схема EDCA не є ефективною, так, у випадку 30 станцій пропускна здатність насиченого голосового потоку практично в три рази нижча, ніж пропускна здатність для схеми DCF.
4. Для безпроводних мереж з великим числом станцій, 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, ймовірність попадання кадру в колізію для такої мережі наближається до одиниці. Таким чином, станція спрямовує свої зусилля не на успішну передачу кадру, а на застосування механізму запобігання колізій.

5. Використання схеми поділу з двома категоріями доступу дозволяє зберегти досить високу загальну пропускну здатність мережі та забезпечити пріоритетний доступ високопріоритетного трафіку. На прикладі мережі з 10 станцій пропускну здатність для високопріоритетного трафіку можна збільшити на  $\approx 30\%$ .
6. Проведено дослідження ефективності роботи схеми доступу EDCA для різного співвідношення низько- та високопріоритетних трафіків, яке показало, що для великих безпроводних мереж зростання частки високопріоритетного трафіку знижує загальну пропускну здатність мережі до 30-35%, при цьому чим більше в мережі категорій доступу, тим нижча загальна пропускну здатність.
7. Показано, що для безпроводної мережі, яка працює у режимі Infrastructure Mode її розмір має критичне значення в контексті забезпечення якості передачі голосового та відео трафіків. Точка доступу є ключовим елементом при передачі кадру між станціями, як наслідок вона зазнає значно більшої завантаженості, ніж станції. Також було показано, що зменшення числа категорій доступу для схеми EDCA дозволяє покращити якість передачі високопріоритетного трафіку в безпроводних мережах середнього та великого розміру.
8. Не зважаючи на те, що стандартом 802.11 для точки доступу визначені параметри MAC підрівня таким чином, що кадри точки доступу отримують перевагу при передачі через безпроводне середовище, її пропускну здатність все одно нижча, ніж пропускну здатність для станції.

Результати даного розділу опубліковані у роботах [79, 90, 100, 101, 104, 105].

## **Розділ 4**

### **Вдосконалення методу доступу до фізичного середовища з пріоритетним обслуговуванням**

У четвертому розділі запропоновано метод підвищення ефективності роботи безпроводної мережі шляхом адаптивного вибору числа категорій доступу для схеми EDCA. Базуючись на результатах досліджень обґрунтовано вибір чинників механізму прийняття рішень адаптивного алгоритму регулювання числа категорій доступу схеми EDCA, сформульовано алгоритм адаптивної зміни числа категорій доступу для схеми EDCA та проаналізовано роботу безпроводної мережі з його застосуванням.

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

Опираючись на результати дослідження ефективності роботи безпроводної 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 безпроводній 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.

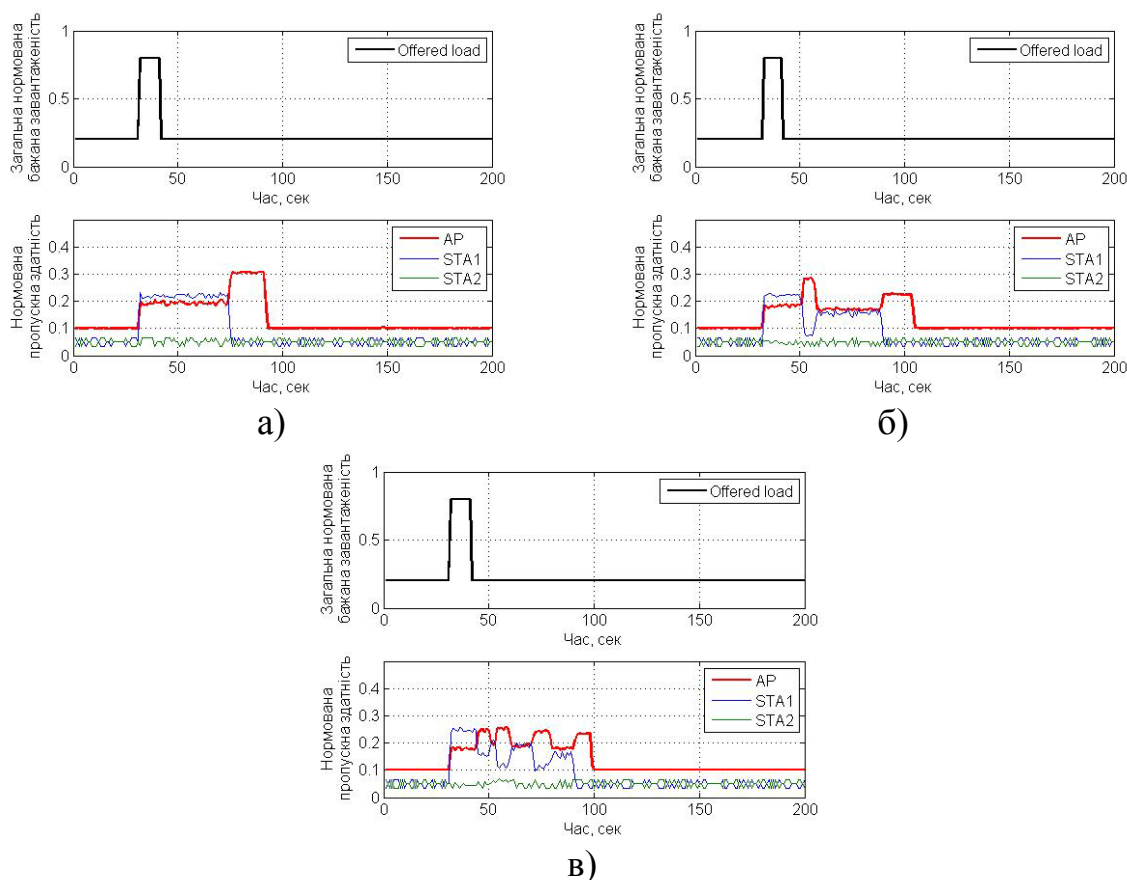


Рисунок 4.1 – Загальна нормована пропускна здатність мережі з двох станцій при схемі поділу трафіку на а) одну, б) дві та в) чотири категорії доступу

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.

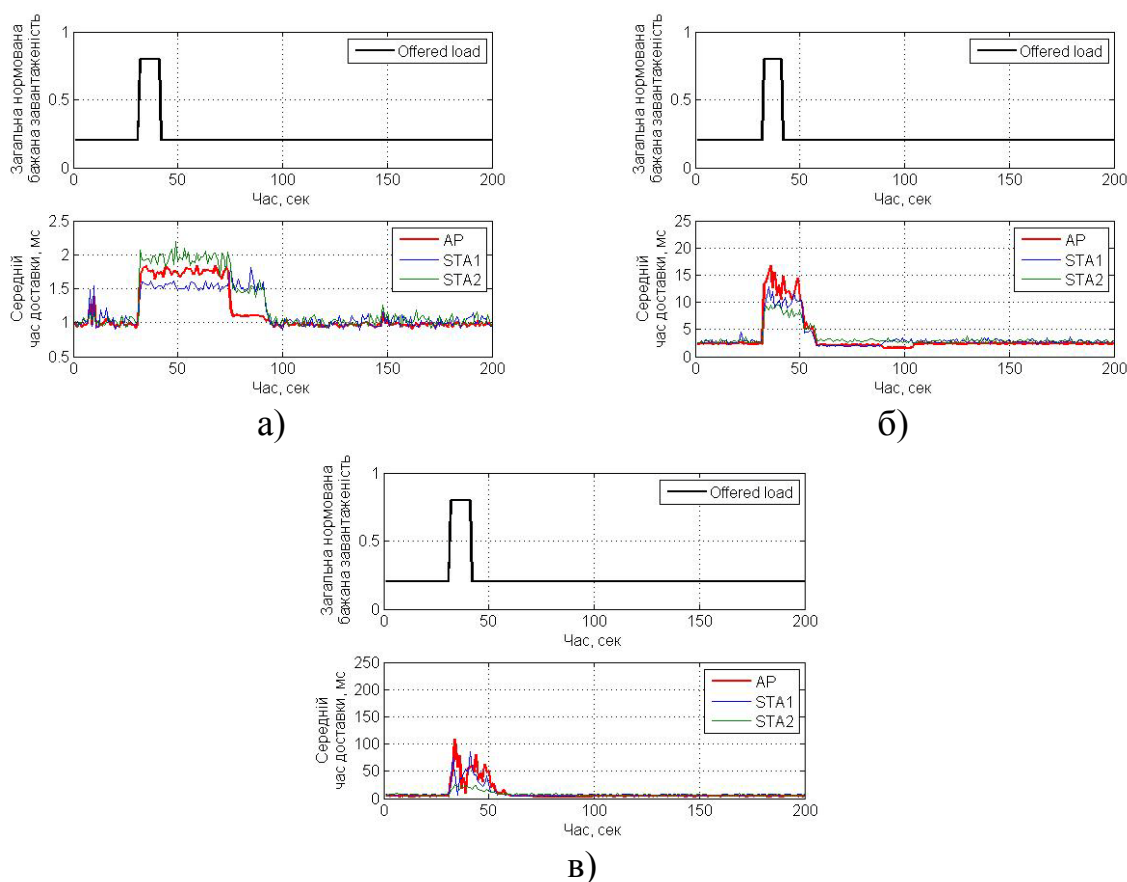


Рисунок 4.2 – Середній час доставки кадру для мережі з двох станцій при схемі поділу трафіку на а) одну, б) дві та в) чотири категорії доступу



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.

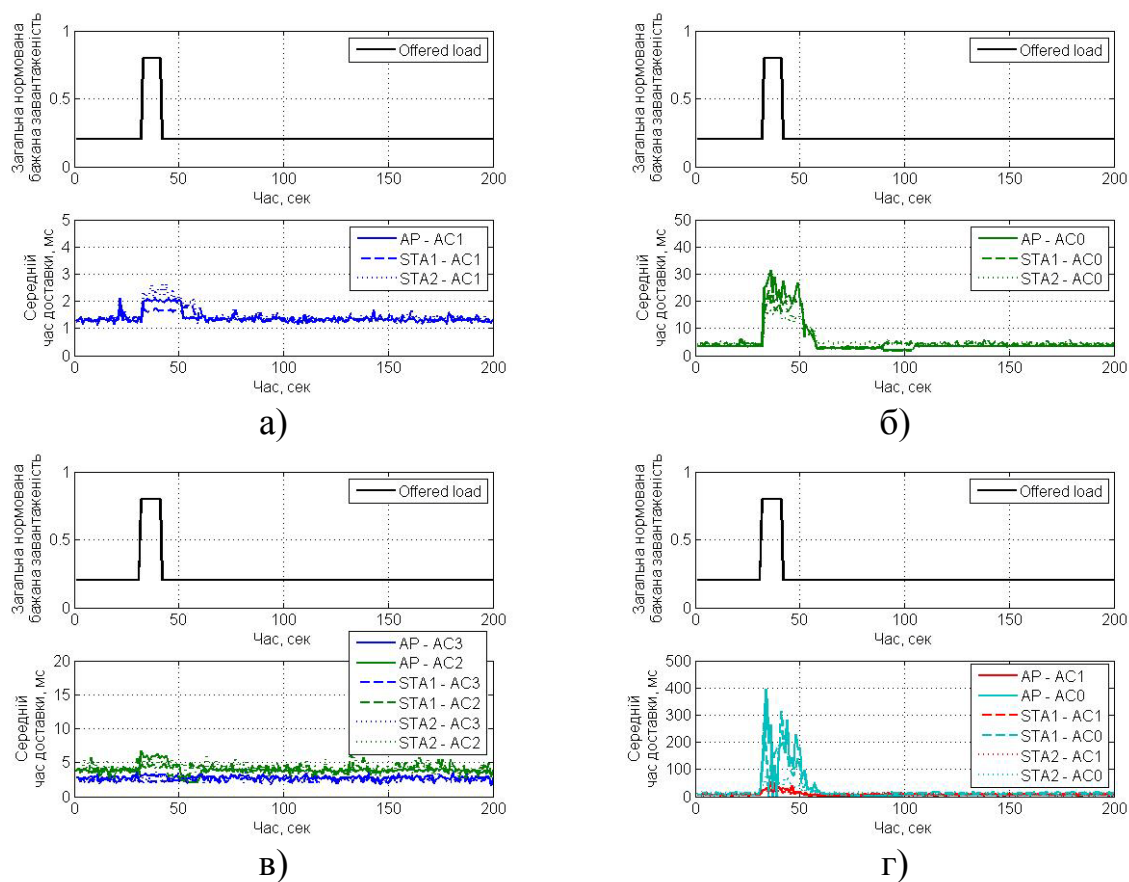


Рисунок 4.3 – Середній час доставки для а), в) високопріоритетних та б), г) низькопріоритетних кадрів для мережі з двох станцій та при схемі поділу трафіку на а), б) дві та в), г) чотири категорії доступу відповідно

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

доставки 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.

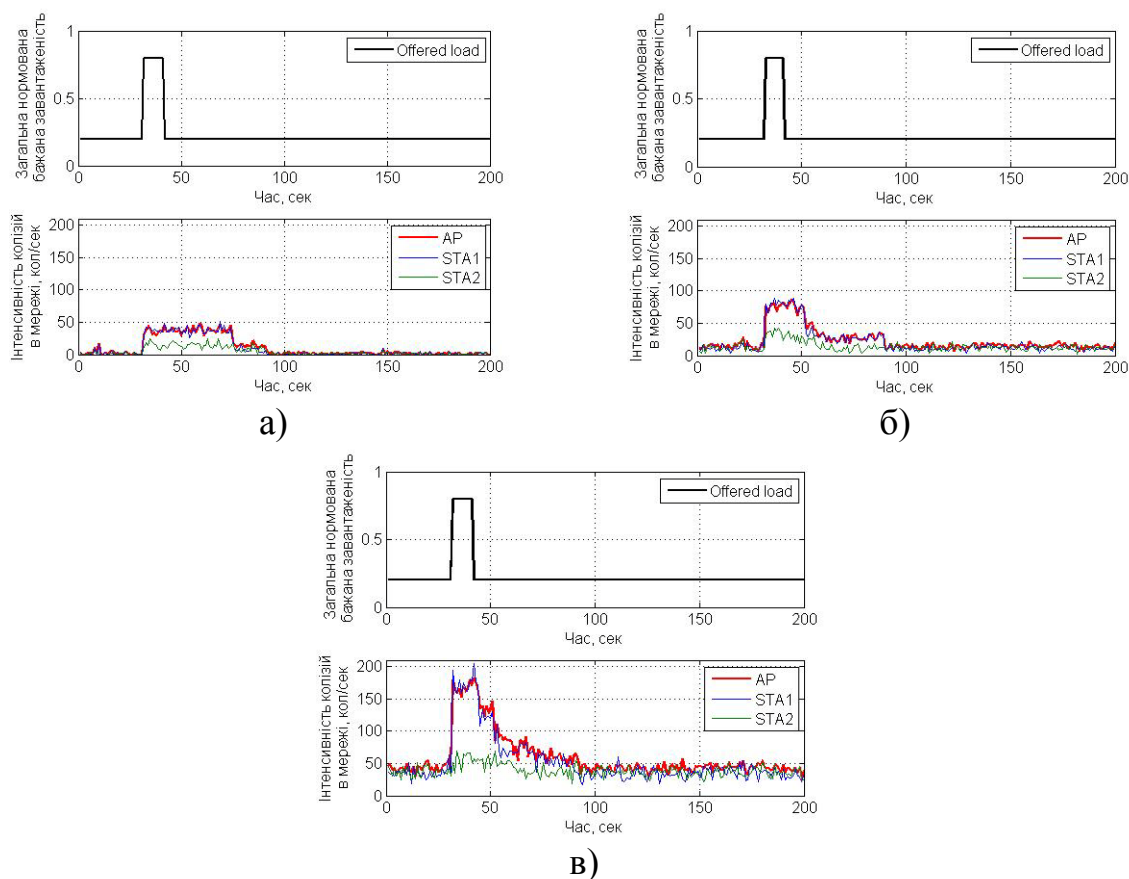


Рисунок 4.4 – Інтенсивність колізій в мережі з двох станцій та при схемі поділу трафіку на а) одну, б) дві та в) чотири категорії доступу відповідно

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

завантаженість 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.

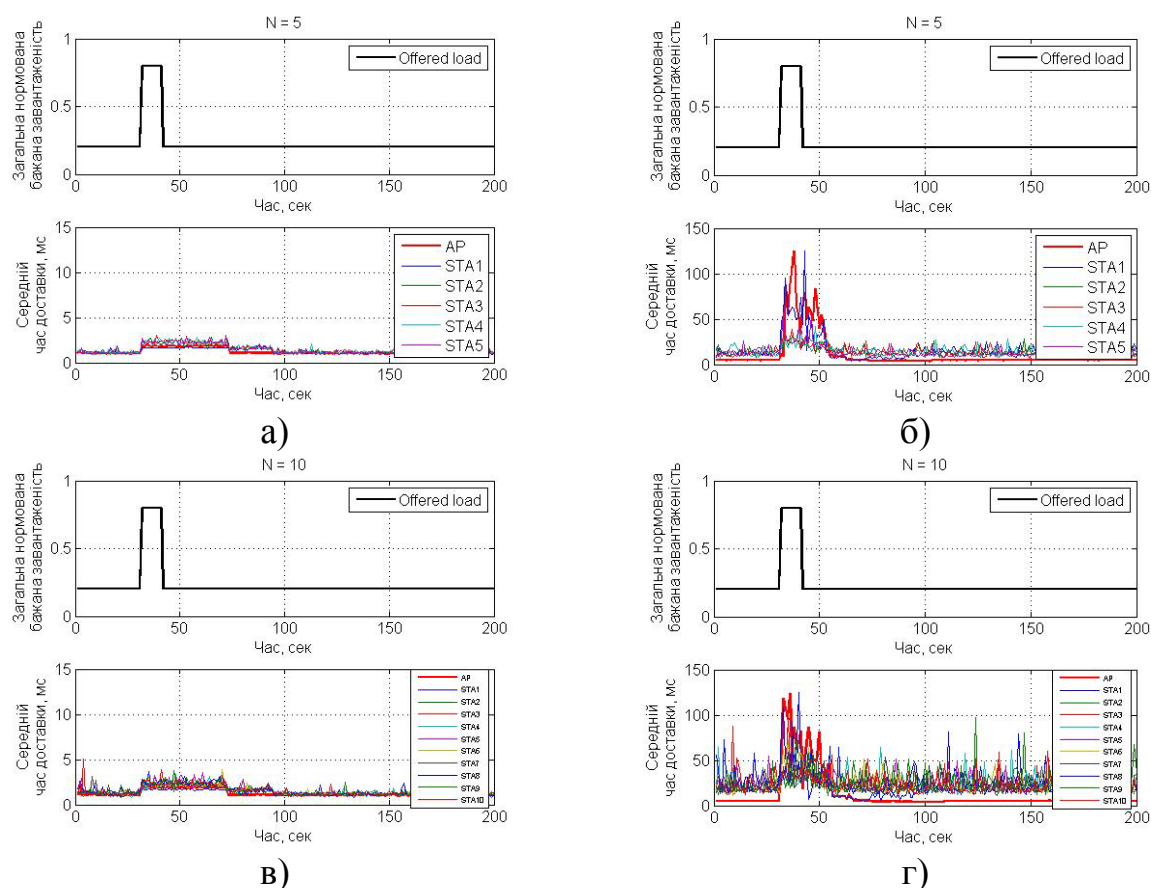


Рисунок 4.5 – Середній час доставки кадру для мережі з 5 та 10 станцій та при схемі поділу трафіку на а), в) одну та б), г) чотири категорії доступу

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.

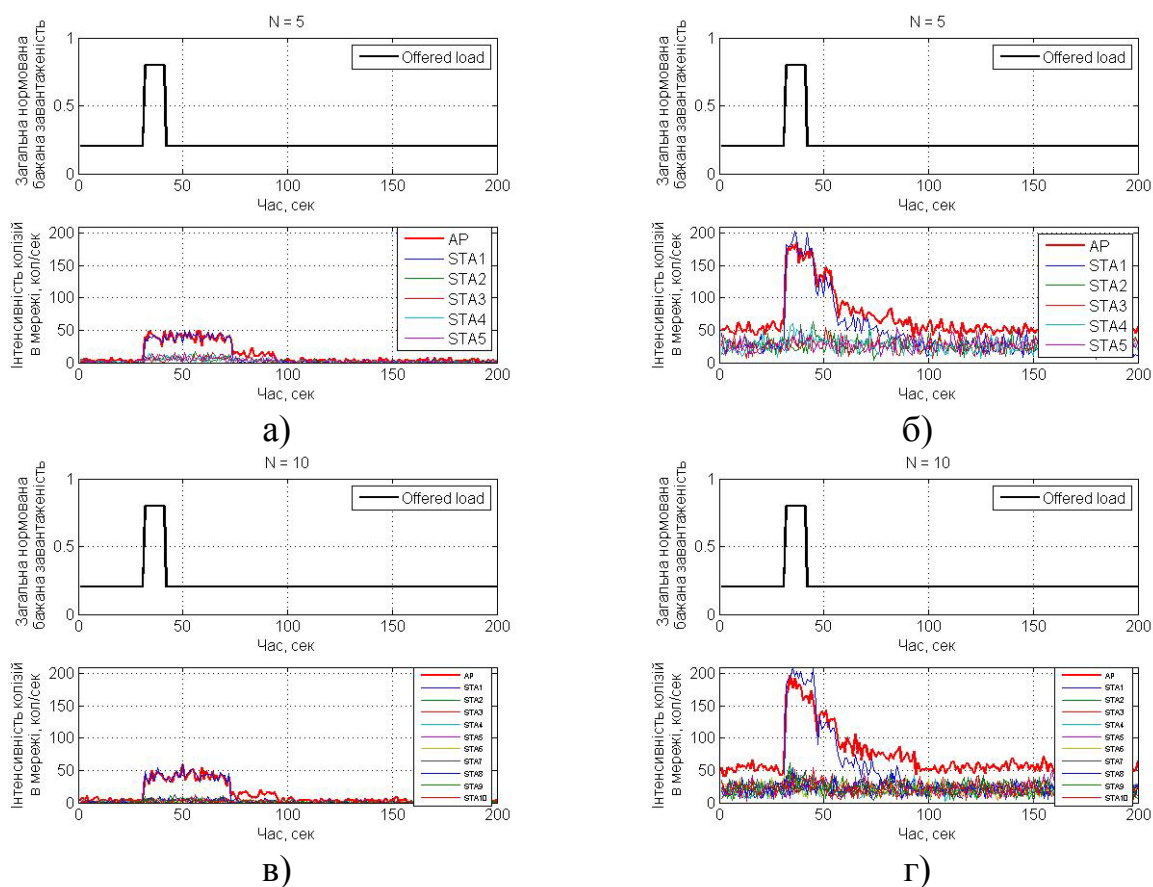


Рисунок 4.6 – Інтенсивність колізій в мережі з 5 та 10 станцій та при схемі поділу трафіку на а), в) одну та б), г) чотири категорії доступу відповідно

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.

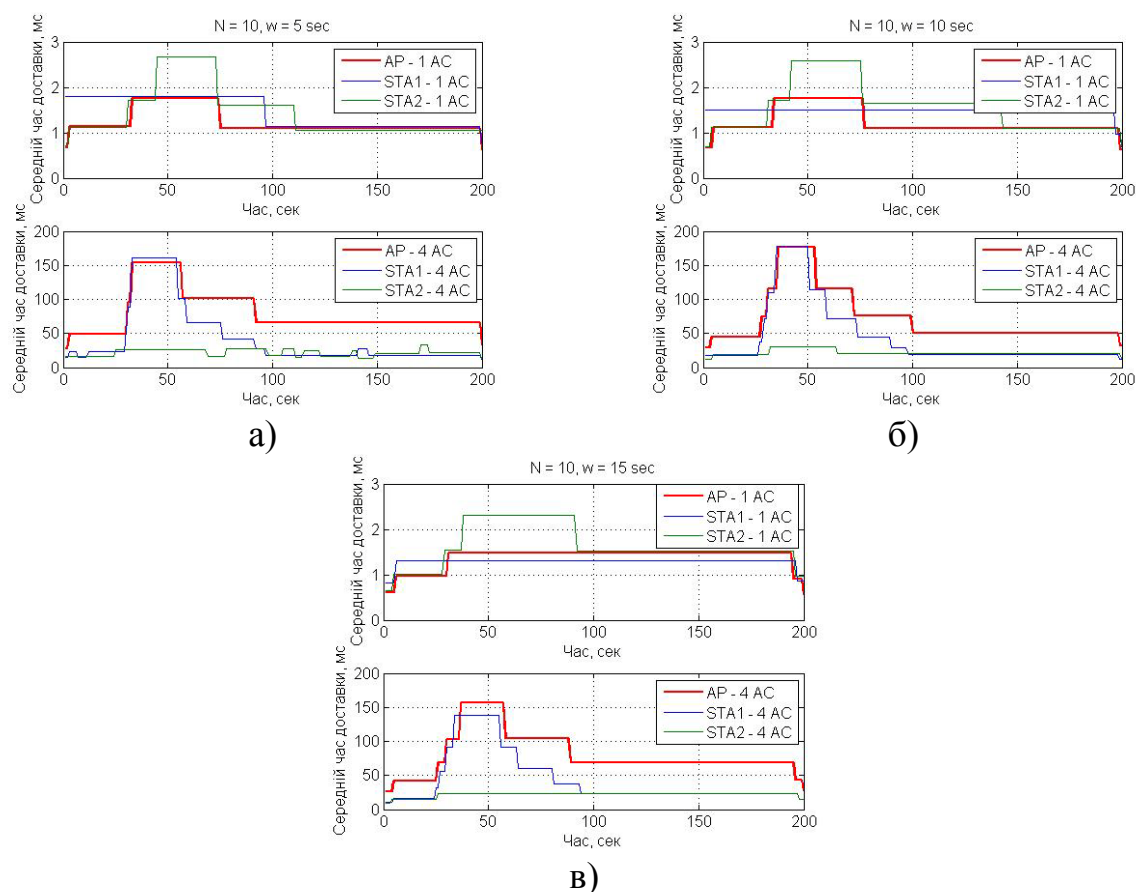


Рисунок 4.7 – Обчислене рухоме середнє з довжиною вікна а) 5, б) 10 та в) 15 значень та з пороговим значенням зміни величини у півтора рази для схем доступу з однією та чотирма категоріями доступу

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.

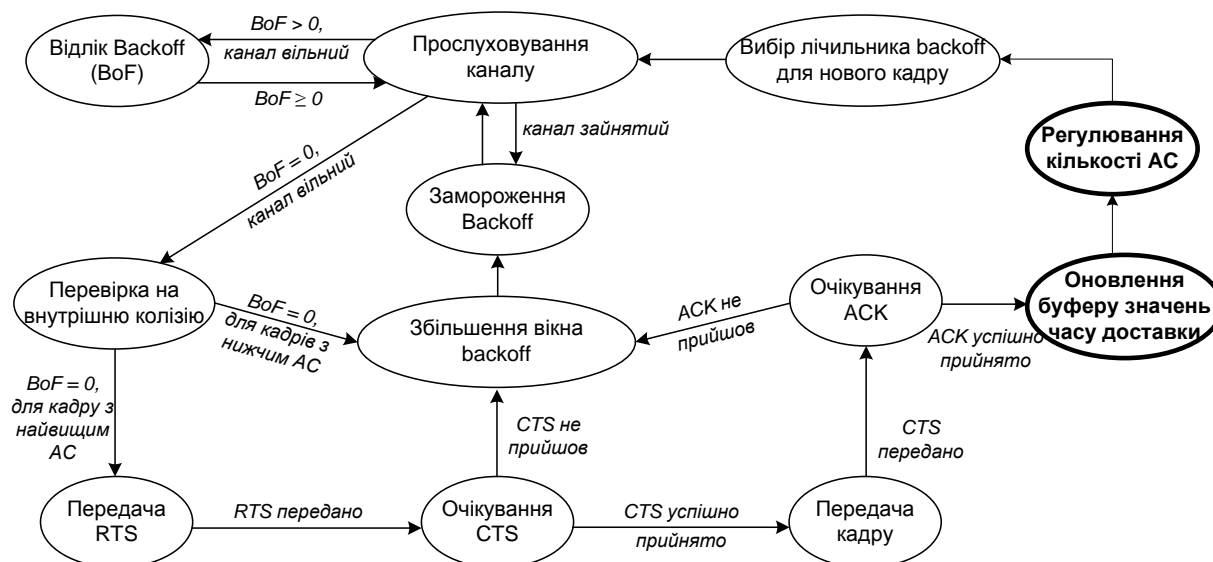


Рисунок 4.8 – Спрощена діаграма станів безпроводної станції на MAC-підрівні з адаптивним регулюванням числа категорій доступу

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  $D_{base}$ , назовемо 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,  $\delta$  – 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 *BOF*, 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.

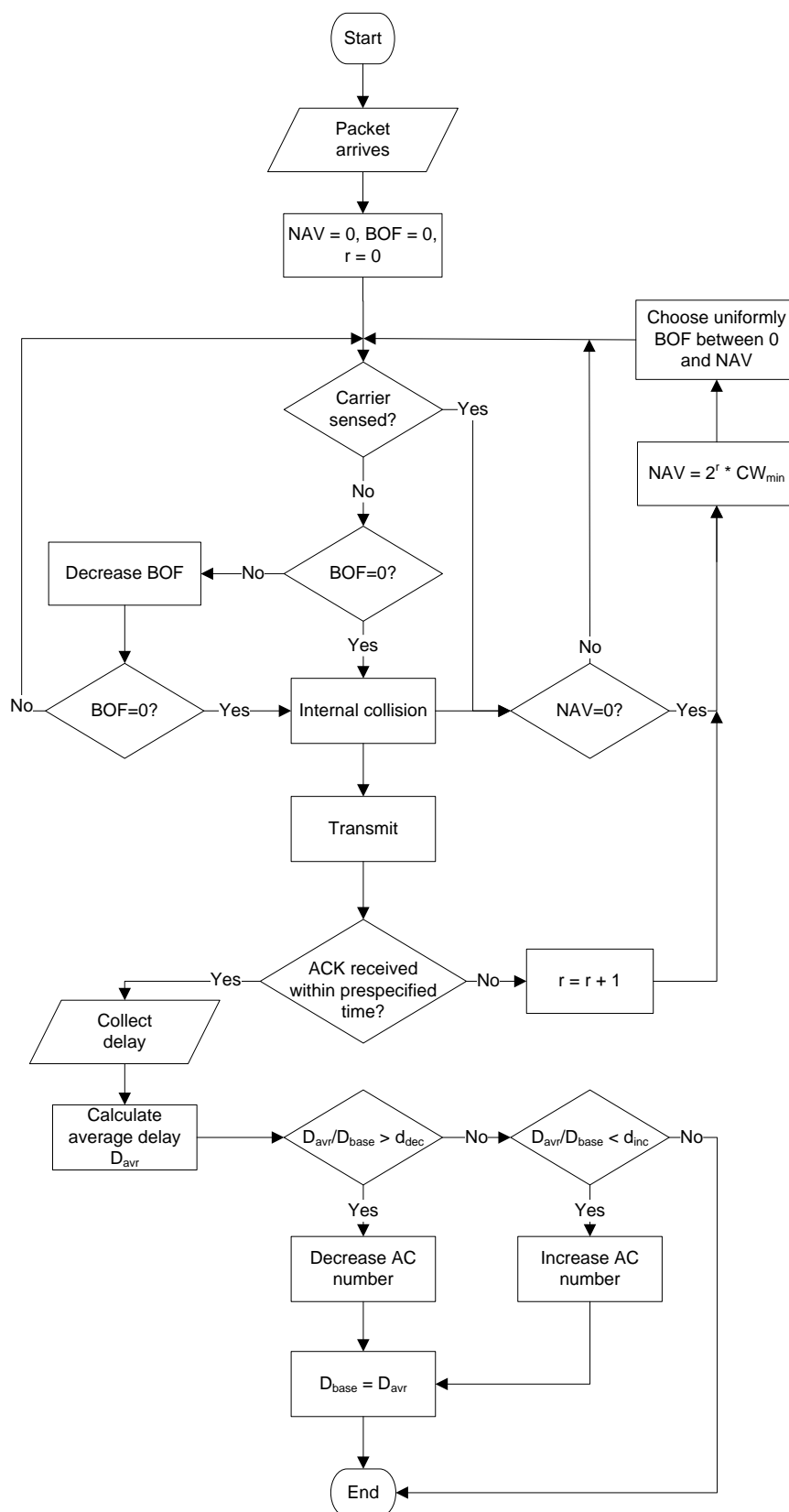


Рисунок 4.9 – Блок-схема функціонування станції на MAC-підрівні під час передачі з використанням адаптивного алгоритму зміни числа категорій доступу

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 опрацьовуватимуться 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 безпроводних 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.

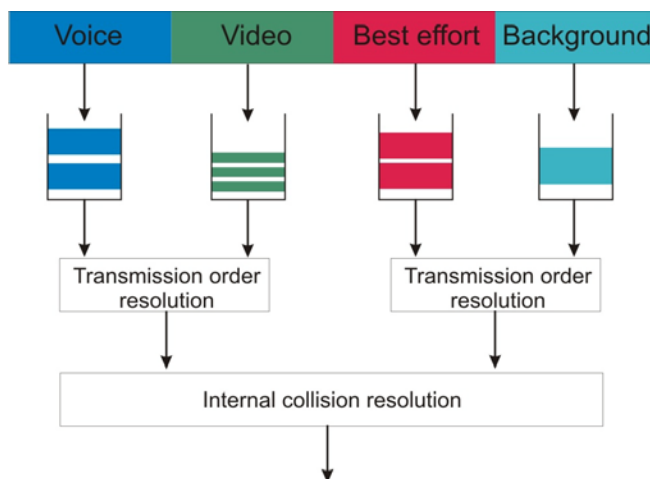


Рисунок 4.10 – Механізм передачі кадрів з чотирьох черг при двох категоріях доступу

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

## Адаптивний алгоритм зміни числа категорій доступу схеми EDCA

<p>ініціалізація значень <math>D_{base}</math>, <math>d_{dec}</math>, <math>d_{inc}</math>  цикл доки є кадри в чергах  якщо надійшов новий кадр, то  якщо середовище вільне протягом AIFS та немає внутрішньої колізії то  розпочати передачу  інакше  запустити процедуру backoff-відтермінування  якщо середовище вільне, то  цикл для кожної черги  якщо <math>BoF &gt; 0</math>, то  зменшити <math>BoF</math>  інакше  якщо середовище вільне протягом AIFS, то  <b>якщо є ще кадри асоційовані з категорією доступу AC,  для яких <math>BoF = 0</math>, то</b>  <b>визначити порядок передачі кадрів згідно пріоритету</b>  якщо відбулась внутрішня колізія, то  запустити процедуру backoff-відтермінування  інакше  розпочати передачу  якщо АСК отримано, то  <b>якщо буфер повний, то</b>  <b>видалити перше значення затримки з буферу</b>  <b>зсунути вміст буферу</b>  <b>записати значення затримки в кінець буферу</b>  <b>обчислити середнє значення затримки в буфері <math>D_{avr}</math></b>  <b>якщо <math>D_{avr}/D_{base} &gt; d_{dec}</math> та число категорій доступу AC <math>&gt; 2</math>, то</b>  <b>зменшити кількість AC</b>  <math>D_{base} = D_{avr}</math>  <b>Інакше</b>  <b>якщо <math>D_{avr}/D_{base} &lt; d_{inc}</math> та число категорій доступу AC <math>&lt; 4</math>, то</b>  <b>збільшити кількість AC</b>  <math>D_{base} = D_{avr}</math>  інакше  збільшити число спроб передачі  запустити процедуру backoff-відтермінування  кінець циклу  кінець циклу</p>
--

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 безпроводної мережі були налаштовані згідно таблиці 3.1. Безпроводна 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 безпроводної 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 4.11а) застосування адаптивної зміни числа категорій доступу дає змогу збільшити загальну пропускну здатність мережі на 3-4%. Для безпроводної 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.

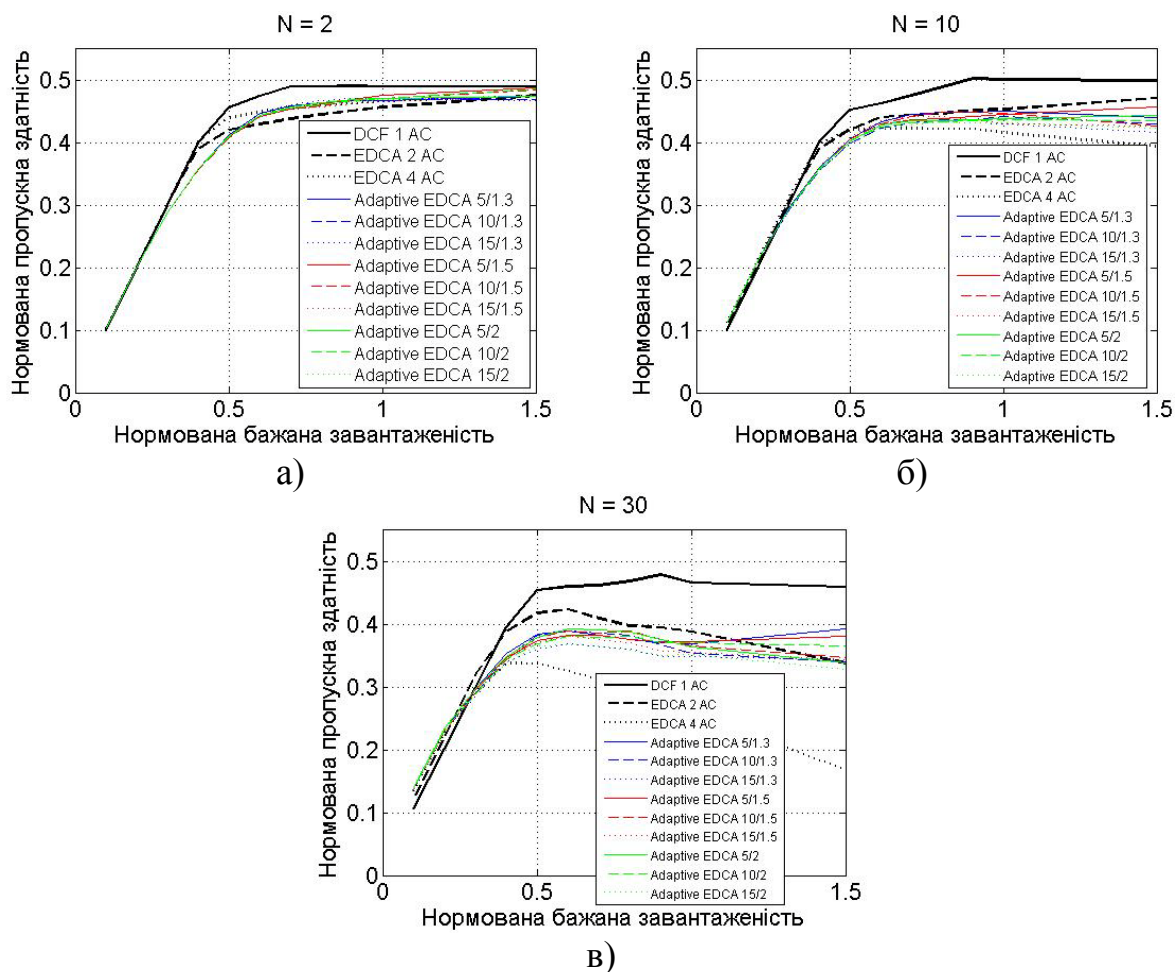


Рисунок 4.11 – Загальна нормована пропускна здатність для мережі з а) 2, б) 10 та в) 30 станцій та при схемі EDCA з адаптивним вибором числа категорій доступу

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 насиченої



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  $\approx 35$  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 завантаженості 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.

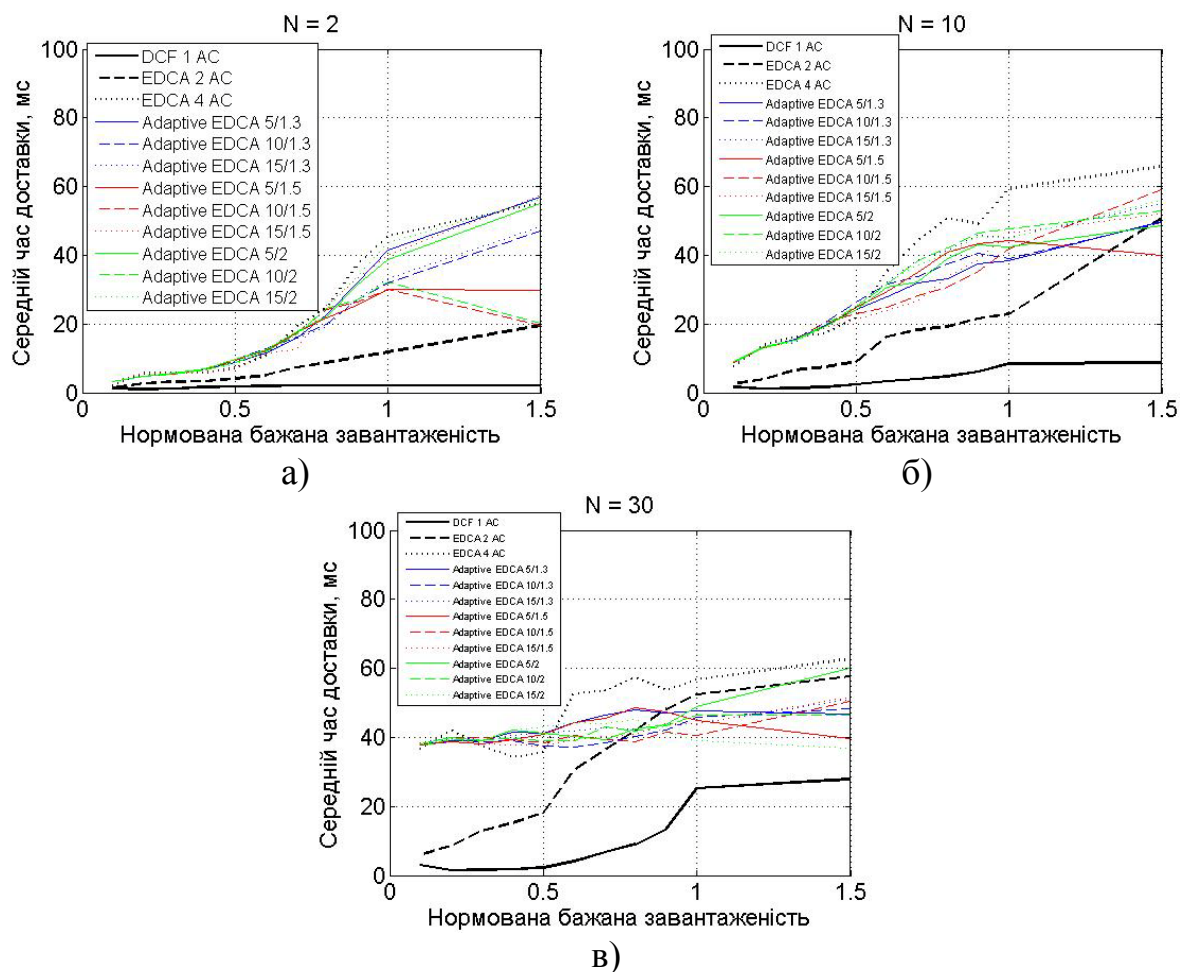


Рисунок 4.12 – Середній час доставки кадру для мережі з а) 2, б) 10 та в) 30 станцій та при схемі EDCA з адаптивним вибором числа категорій доступу

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 вищеописаного 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%.

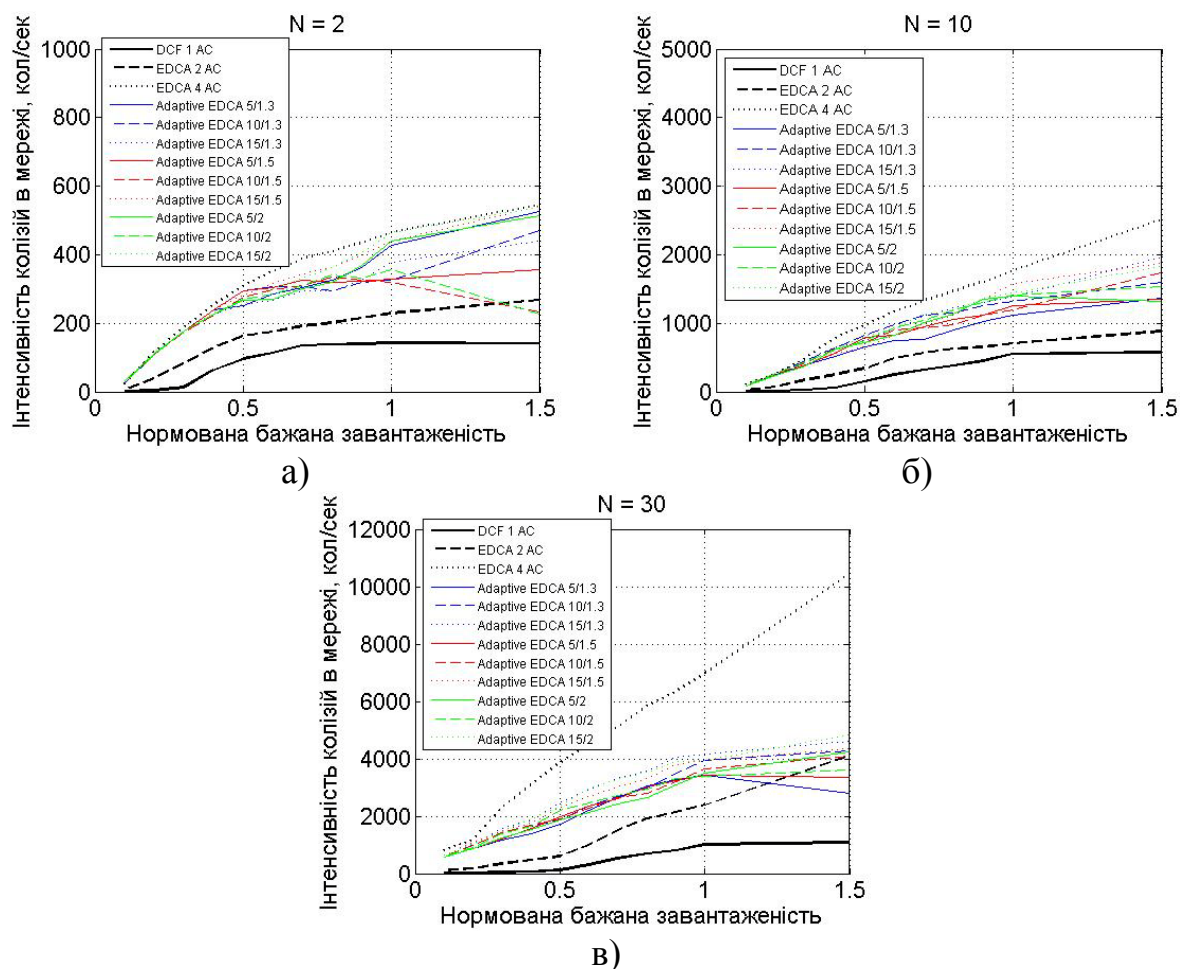


Рисунок 4.13 – Інтенсивність колізій для мережі з а) 2, б) 10 та в) 30 станцій та при схемі EDCA з адаптивним вибором числа категорій доступу

Отже, можемо підсумувати, що запропонована схема адаптивної зміни числа категорій доступу покращує загальні характеристики безпроводної 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.

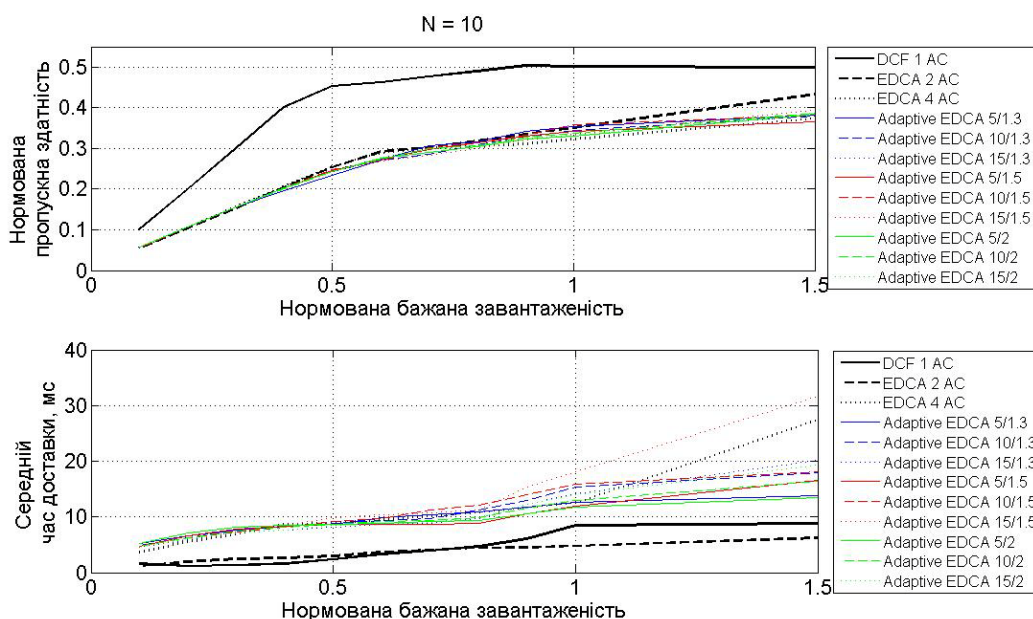


Рисунок 4.14 – Нормована пропускну здатність та середній час доставки кадру для високопріоритетного трафіку мережі з 10 станцій для схеми з адаптивним вибором числа категорій доступу

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 пропускній 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.

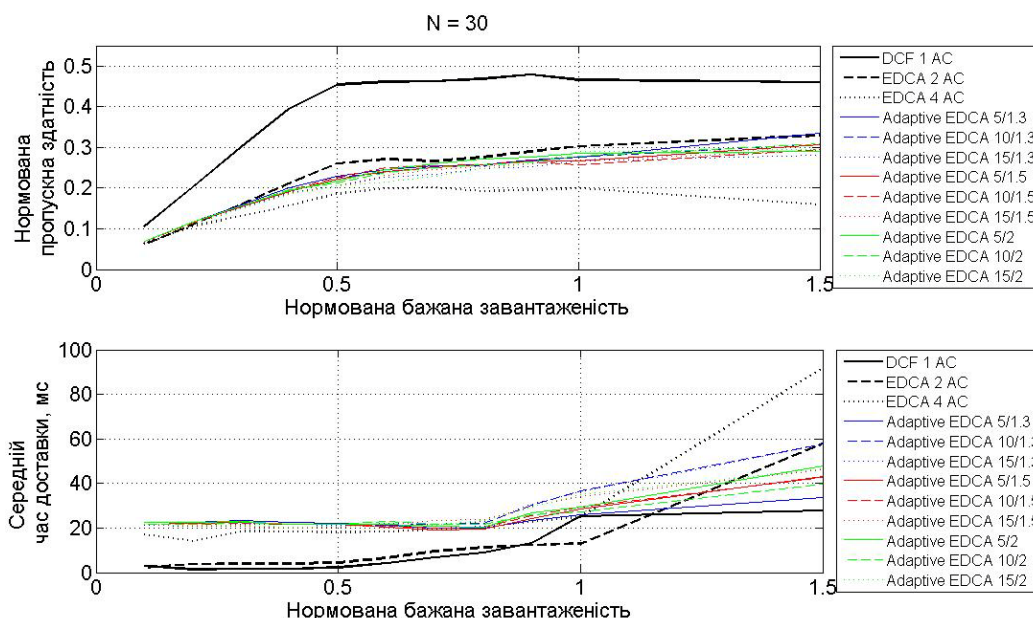


Рисунок 4.15 – Нормована пропускна здатність та середній час доставки кадру для високопріоритетного трафіку мережі з 30 станцій для схеми з адаптивним вибором числа категорій доступу

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 безпроводної 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.

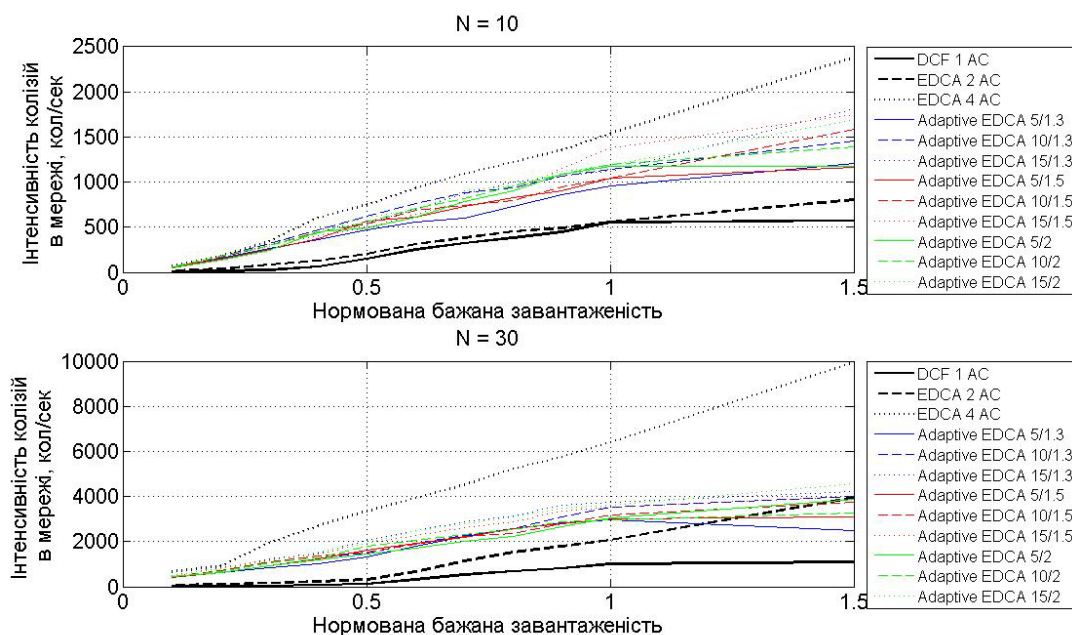


Рисунок 4.16 – Інтенсивність колізій для високопріоритетного трафіку мережі для схеми з адаптивним вибором числа категорій доступу

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.

#### **4.4. Висновки до розділу**

1. Досліджено зміну пропускну здатності, середнього часу доставки та рівня інтенсивності колізій для станцій та точки доступу зі зміною завантаженості в мережі та показано, що найкраще оцінити стан завантаженості мережі дає змогу середній час доставки кадру. Різке зростання завантаженості в мережі спричиняє зростання середнього часу доставки щонайменше у 2-2.5 рази.
2. Запропоновано алгоритм роботи схеми адаптивного вибору числа категорій доступу для схеми доступу EDCA.
3. Дослідження роботи запропонованої схеми адаптивної зміни числа категорій доступу з залежністю від зміни часу доставки кадру показало, що для великих мереж (в даній роботі досліджувалась мережа з 30 станцій) та при високих значеннях бажаної завантаженості мережі (> 60%) адаптивна зміна числа категорій доступу дозволяє покращити загальні характеристики безпроводної мережі – підвищує загальну

пропускну здатність мережі (на 20-40%), знижує середній час доставки кадру (на 30-40%) та рівень інтенсивності колізій (на 26-48%).

4. Також, за допомогою дослідження було показано, що запропонована схема адаптивної зміни числа категорій доступу може підвищити якість обслуговування високопріоритетного трафіку за рахунок підвищення пропускної здатності та зменшення часу доставки. Так, за умови високої завантаженості мережі (40-100%) для мережі, яка обслуговує 30 станцій, величина переданого високопріоритетного трафіку може зрости на 25-40% порівняно зі стандартною схемою доступу, а середній час доставки кадру може знизитись на 60%.
5. 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.

Результати даного розділу опубліковані у роботах [80, 101, 105, 106, 107, 108].



## Висновки

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

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Розроблена інформаційна технологія симуляції роботи МАС-підрівня безпроводної мережі дає змогу досліджувати методи доступу до фізичного середовища на МАС-підрівні безпроводних мереж за різноманітних умов функціонування та стану середовища, вносити зміни в алгоритми функціонування МАС-підрівня та характеристики потоків трафіку, а також моделювати та аналізувати розгалужені безпроводні мережі.
2. Розроблена імітаційна модель МАС-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 безпроводних 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 безпроводної 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 безпроводної мережі на раптові короткотривалі зростання завантаженості однієї зі станцій безпроводної 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 безпроводної мережі та дозволяє підвищити ефективність роботи MAC-підрівня безпроводної 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.

## Літэратура

1. IEEE Std 802.11<sup>TM</sup>-1997, IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, 1997.
2. IEEE Std 802.11ad<sup>TM</sup>-2012, 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, 2012.
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, 2004.
5. IEEE Std 802.11<sup>TM</sup>-2007, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2007.
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, 2005. – 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. – 2003. – 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, 2008. – 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. – 2004. – 87(6). – P.1724-1729.
10. Xiao Y. A simple and effective priority scheme for IEEE 802.11 / Y. Xiao // IEEE. Communication Letters. – 2003. – 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. – 2003. – 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 2003. – 2. – P.1151-1156.
13. Кученко Ю. Ратификация IEEE: конец отрочеству 802.11n [Электронный ресурс] / Ю. Кученко // Все об IT - ИТС.UA. - 2009. - Режим доступа до ресурсу: <http://its.ua/node/41616>.
14. Шахнович И. Стандарт IEEE 802.11n – уж скоро. Примирение непримиримых / И. Шахнович // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. – 2006. – 1. – С.52-58.
15. Thornycroft P. Designed for speed: Network infrastructure in an 802.11n world / P. Thornycroft // Aruba Networks: White Paper. – 2007. – V2.7.
16. 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.
17. Млинарски Ф., Станут ли сети стандарта 802.11n “добрыми соседями”? / Ф. Млинарски // Сети и системы связи. – 2008. – 3. – P.46-49.

18. 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 2002. – P.59-63.
19. 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 2007.
20. Bansal A. Mandating QoS in Wireless LANs: White Paper [Электронный ресурс] / A. Bansal // NewLogic Technologies. – 2005. – Режим доступа до ресурсу: [http://www.newlogic.com/products/802\\_11\\_wireless\\_abg/mandating\\_qos\\_in\\_wireless\\_lans.pdf](http://www.newlogic.com/products/802_11_wireless_abg/mandating_qos_in_wireless_lans.pdf).
21. Changwen L. Delayed Channel Access for IEEE 802.11e Based WLAN / L. Changwen, A.P. Stephens // IEEE International Conference on Communication, June 2006. – 10. – P.4811-4817.
22. 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.
23. Skordoulis D. A selective delayed channel access (SDCA) for the high-throughput IEEE 802.11n / D. Skordoulis, Q. Ni, C. Zarakovitis // Proceedings of the 2009 IEEE conference on Wireless Communications & Networking Conference, Budapest, 5-8 April 2009. – P.1-6.
24. Lin Y.S. Scheduling Mechanism for WLAN Frame Aggregation with Priority Support / Y.S. Lin, J.Y. Wang, W.S. Hwang // Proceedings of the 2006 Joint Conference on Information Sciences, JCIS 2006, Kaohsiung, Taiwan, ROC, October 8-11, 2006. – P.844-847.
25. Ni J. Distributed CSMA/CA Algorithms for Achieving Maximum Throughput in Wireless Networks / J. Ni, R. Srikant // 2009 Information Theory and Applications Workshop (ITA), San Diego, California, February 2009.

26. Cali F. IEEE 802.11 Protocol: Design and Performance Evaluation of an Adaptive Backoff Mechanism / F. Cali, M. Conti, E. Gregori // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2000. – 18(9). – P.1774-1786.
27. Kim Y.-D. Distance Adaptive Contention Window Mechanism for Wireless Sensor Networks / Y.-D. Kim, W.-S. Kang, D.-H. Lee, J.-H. Yu // Proceedings of the 23rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, July 6-9, 2008, Shimonoseki City, Yamaguchi-Pref., Japan. – P.1693-1696.
28. Bononi L. Design and Performance Evaluation of an Asymptotically Optimal Backoff Algorithm for IEEE 802.11 Wireless LANs / L. Bononi, M. Conti, E. Gregori // Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, Hawaii, January 4-7, 2000.
29. Vittorio S. An Approach to Enhance the QoS Support to Real-Time Traffic on IEEE 802.11e Networks / S. Vittorio, L.L. Bello // In 6th International WORKSHOP On Real Time Networks, Jul. 2007.
30. Naoum-Sawaya J. Adaptive Approach for QoS Support in IEEE 802.11e Wireless LAN / J. Naoum-Sawaya, B. Ghaddar, S. Khawam, H. Safa, H. Artail, Z. Dawy // Proceedings of the IEEE International Conference on Wireless And Mobile Computing, Networking And Communications, 2005, (WiMob'2005), Montreal, Canada, August 22-24, 2005. – P.167-173.
31. Jang K.-W. A New Backoff Algorithm to Guarantee Quality of Service over IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks / K.-W. Jang // Wireless On-Demand Network Systems: Lecture Notes in Computer Science. – 2004. – 2928. – P.77-86.
32. Baroudi U. Performance analysis of Internet applications over an adaptive IEEE 802.11 MAC architecture / U. Baroudi, A.M. Mohiuddin // Journal of the Franklin Institute. – 2006. – 343(4-5). – P.352-360.
33. Xu D. An Analysis of Different Backoff Functions for an IEEE 802.11 WLAN / D. Xu, T. Sakurai, H.L. Vu // Proceedings of the 68th Semi-Annual

- IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2008-Fall, Calgary, Canada, 21-24 September 2008. – P.1-5.
34. Vitsas V. Throughput analysis of linear backoff scheme in wireless LANs / V. Vitsas // *Electronics Letters*. – 2003. – 39(1). – P.99-100.
  35. Xu D. An Access Delay Model for IEEE 802.11e EDCA / D. Xu, T. Sakurai, H.L. Vu // *IEEE Transactions on Mobile Computing*. – 2009. – 8(2). – P.261-275.
  36. Jangid A.K. Modified DCF for Throughput Enhancement in WLAN / A.K. Jangid, N. Sharma // *Proceedings of the 14th National Conference on Communications, February 01-03, 2008, Bombay, Mumbai*.
  37. Zhao Y. Adaptive EDCA Algorithm Using Video Prediction for Multimedia IEEE 802.11e WLAN / Y. Zhao, H. Liu // *Proceedings of the Second International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'06)*. – 2006. – P.10.
  38. Cano C. Adaptive Admission Control Mechanism for IEEE 802.11e WLANs / C. Cano, B. Bellalta, M. Oliver // *The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 07), Athens, Greece, September 2007*.
  39. Крылов В.В. Теория телетрафика и ее приложения / В.В. Крылов, С.С. Самохвалова. – Спб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.
  40. Вишнеvский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / В.М. Вишнеvский. – М.: Техносфера, 2003. – 512с.
  41. Bianchi G. IEEE 802.11 – Saturation Throughput Analysis / G. Bianchi // *IEEE Communications Letters*. – 1998. – Vol. 2, No. 12. – P.318-320.
  42. Bianchi G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function / G. Bianchi // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 2000. – Vol. 18, No. 3. – P.535-547.

43. Cali F. IEEE 802.11 Wireless LAN: Capacity Analysis and protocol enhancement / F. Cali, M. Conti, E. Gregory // Proc. INFOCOM'98. - San Francisco, 1998. – P.142-149.
44. Bianchi G. Remarks on IEEE 802.11 DCF Performance Analysis / G. Bianchi, I. Tinnirello // IEEE Communications Letters. – 2005. – Vol. 9, No. 8. – P.765-767.
45. Vu H.L. Collision Probability in Saturated IEEE 802.11 Networks / H.L. Vu, T. Sakurai // Proc. of Australian Telecommunication Networks and Applications Conference, Melbourne, Australia, Dec. 2006. – P.21-25.
46. Sakurai T. MAC Access Delay of IEEE 802.11 DCF / T. Sakurai, H.L. Vu // IEEE Transaction on Wireless Communications. – 2007. – 6(5). – P.1702-1710.
47. Duffy K. Modeling the 802.11 Distributed Coordination Function in Non-Saturated Conditions / K. Duffy, D. Malone, D.J. Leith // IEEE Communications Letters. – 2005. – Vol. 9, No. 8. – P.715-717.
48. Alizadeh-Shabdiz F. A Finite Load Analytical Model for the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function MAC / F. Alizadeh-Shabdiz, S. Subramaniam // Proceedings of the Workshop on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt '03). - Sophia Antipolis, France, March 2003. – P.321-322.
49. Liaw Y.S. Performance Analysis of IEEE 802.11 DCF under Limited Load / Y.S. Liaw, A. Dadej, A. Jayasuriya // IEEE 11th Asia Pacific Conference on Communications (APCC 2005). - Perth, Western Australia, 3-5 October 2005. – P.759-763.
50. Hung F.-Y. Analysis of Non-Saturation and Saturation Performance of IEEE 802.11 DCF in the Presence of Hidden Stations / F.-Y. Hung, I. Marsic // Proceedings of the 66th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall 2007). - Baltimore, MD, USA, 30 September - 3 October 2007. – P.230-234.



51. Zhai H. Performance analysis of IEEE 802.11 MAC protocols in wireless LANs / H. Zhai, Y.G. Kwon, Y. Fang // *Wireless Communications and Mobile Computing*. – 2004. – 4. – P.917-931.
52. Lee Y. Performance Analysis of IEEE 802.11 DCF under Nonsaturation Condition / Y. Lee, M.Y. Chung, T.-J. Lee // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2008. – Vol. 2008, Article ID 574197. – P.17.
53. Alazemi H.M.K. Stochastic modelling and analysis of 802.11 DCF with heterogeneous non-saturated nodes / H.M.K. Alazemi, A. Margolis, J. Choi, R. Vijaykumar, S. Roy // *Computer Communications*. – 2007. – 30. – P.3652-3661.
54. Tickoo O. A queueing model for finite load IEEE 802.11 random access MAC / O. Tickoo, B. Sikdar // *Proceedings of IEEE International Conference on Communication (ICC'2004)*, Paris, France, June 20-24, 2004. – 1. – P.175-179.
55. Vishnevsky V.M. 802.11 LANs: Saturation Throughput in the Presence of Noise / V.M. Vishnevsky, A.I. Lyakhov // *Proc. of 2nd International IFIP TC6 Networking Conf. (Networking 2002)*. - Pisa, Italy: *Lecture Notes in Computer Science*, May 19-24, 2002. – Vol. 2345. – P.1008-1019.
56. Tao Z. An Analytical Model for the IEEE 802.11e Enhanced Distributed Coordination Function / Z. Tao, S. Panwar // *IEEE International Conference on Communications*. – 2004. – 7. – P.4111-4117.
57. Engelstad P.E. Closed-form Solution of the Bianchi Model for 802.11e EDCA and IEEE 802.11 DCF / P.E. Engelstad, O.N. Osterbo // *Proceedings of the 15th IST Mobile & Wireless Communication Summit (ISTsummit'06)*, Mykonos, Greece (Hellas), June 4-8, 2006.
58. Xu D. An analytical model of MAC access delay in IEEE 802.11e EDCA / D. Xu, T. Sakurai, H.L. Vu // *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'06)*. – 2006. – 4. – P.1938-1943.

59. Hu J. An Analytical Model for IEEE 802.11e WLANs under Unsaturated Traffic Conditions / J. Hu, G. Min, M.E. Woodward, W. Guo // PGNet 2007. - Liverpool, UK, June 2007.
60. Engelstad P.E. Analysis of QoS in WLAN / P.E. Engelstad, O.N. Osterbo // *Teletronikk.* – 2005. – 1. – P.132-147.
61. Engelstad P.E. An Analytical Model of the Virtual Collision Handler of 802.11e / P.E. Engelstad, O.N. Osterbo // *Proceedings of the Eighth ACM International Symposium on Modeling, Analysis & Simulation of Wireless and Mobile Systems (ACM MSWiM 2005)*, Montreal, Canada, Oct. 10-13, 2005. – P.255-259.
62. Engelstad P.E. Non-Saturation and Saturation Analysis of IEEE 802.11e EDCA with Starvation Prediction / P.E. Engelstad, O.N. Osterbo // *Proceedings of the Eighth ACM International Symposium on Modeling, Analysis & Simulation of Wireless and Mobile Systems (ACM MSWiM 2005)*, Montreal, Canada, Oct. 10-13, 2005. – P.224-233.
63. Engelstad P.E. The Delay Distribution of IEEE 802.11e EDCA and 802.11 DCF / P.E. Engelstad, O.N. Osterbo // *Proceedings of the 25th IEEE International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC'06)*, Phoenix, Arizona, April 10 - 12, 2006.
64. Engelstad P.E. Analysis of the Total Delay of IEEE 802.11e EDCA and 802.11 DCF / P.E. Engelstad, O.N. Osterbo // *Proceedings of IEEE International Conference on Communication (ICC'2006)*, Istanbul, June 11-15, 2006. – P.552 - 559.
65. Banchs A. Throughput Analysis and Optimal Configuration of 802.11e EDCA / A. Banchs, L. Vulliamy // *Computer Networks.* – 2006. – 50(11). – P.1749-1768.
66. Fraleigh J.B. *A First Course in Abstract Algebra. Fifth Edition* / J.B. Fraleigh., 1994. – 556 p.

67. Sobeih A. J-Sim: An Integrated Environment for Simulation and Model Checking of Network Protocols / A. Sobeih, M. Viswanathan, D. Marinov, J.C. Hou // Proceedings of the Parallel and Distributed Processing Symposium, Long Beach, CA, 2007. – P.1-6.
68. Varga A. Ommet++ – discrete event simulation system. / A. Varga // Proceedings of the European Simulation Multiconference. – 2001.
69. DARPA/NSF. The network simulator – ns-2 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
70. The ShoX developers. ShoX – a scalable ad hoc network simulator [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://shox.sourceforge.net>.
71. Di P. Towards Comparable Network Simulations / P. Di, Y. Hourri, K. Kutzner, T. Fuhrmann // Technical Report 2008-9, ISSN 1432-7864, Dept. of Computer Science, Universität Karlsruhe (TH). – 2008.
72. Orfanus D. Performance of wireless network simulators: a case study / D. Orfanus, J. Lessmann, P. Janacik, L. Lachev // Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Performance Monitoring and Measurement of Heterogeneous Wireless and Wired Networks, PM2HW2N 2008, Vancouver, British Columbia, Canada, October 31, 2008. - P.59-66.
73. Lessmann J. Comparative Study of Wireless Network Simulators / J. Lessmann, P. Janacik, L. Lachev, D. Orfanus // Proceedings of the Seventh International Conference on Networking, (April 13 - 18, 2008). IEEE Computer Society, Washington, DC. - P.517-523.
74. Rahman M.A. Network modelling and simulation tools / M.A. Rahman, A. Pakstas, F.Z. Wang // Simulation Modelling Practice and Theory. - 2009. - 17(6). - P.1011-1031.
75. Rahman M.A. A Comparison of Models Designed using Different Kinds of Network Simulation Tools / M.A. Rahman, A. Pakstas, F.Z. Wang // PGNET 2007, Liverpool, UK, June 2007.

76. Леонтьєва О. Дослідження пріоритетного підходу в доступі до фізичного середовища на MAC-підрівні безпроводних мереж / О. Леонтьєва, К. Обельовська // Вісник НУ “Львівська політехніка” : “Комп’ютерні науки та інформаційні технології”. – Львів, 2007. – 598. – С.37-44.
77. Леонтьєва О. Аналіз аналітичних моделей безпроводних мереж стандарту 802.11/ О. Леонтьєва // Технічні вісті. – 2010. – 1(31)-2(32). – С.113-117.
78. Obelovska K. Extended wireless CSMA/CA for adaptive traffic flow control / K. Obelovska, O. Leontyeva // Технічні вісті. – 2011. – 1(33)-2(34). – С.31-33.
79. Леонтьєва О. Порівняння пропускних здатностей схем доступу DCF та EDCA безпроводних локальних мереж / О. Леонтьєва, К. Обельовська // НУ “Львівська політехніка” : “Комп’ютерні науки та інформаційні технології”. – 2012. – 744. – С.64-68.
80. Панова О.С. Аналіз впливу адаптивної зміни числа категорій доступу схеми EDCA на часові характеристики безпроводної мережі / О.С. Панова, К.М. Обельовська // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Інформаційні системи та мережі. – 2015. – 814. – С.112-119.
81. Law C.L. Trial-based Study of Next Generation Wireless LAN (NGWLAN) Technology in Singapore / C.L. Law // 4th Infocomm Technology Roadmap Seminar. - Singapore, 26 November 2002.
82. Lee C.-W. System Study of the Wireless Multimedia Ad-hoc Network / C.-W. Lee, J.C.L. Liu, K. Chen, Y.-C. Tseng, S.P. Kuo // International Journal of Security and Its Applications. - 2008. - 2 (2). - P.23-40.
83. Enterprise Wireless Competitive Performance Test Results [Електронний ресурс] // Cisco Systems: White Paper. – 2010. – Режим доступу до

- ресурсу: [http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns340/ns394/ns348/ns767/comp\\_test\\_results\\_wp\\_c11-558406.pdf](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns340/ns394/ns348/ns767/comp_test_results_wp_c11-558406.pdf).
84. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 4-е изд. / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб: Питер, 2010. – 944 с.
  85. Душин В.К. Теоретические основы информационных процессов и систем: Учебник. / В.К. Душин. – Издательско-торговая корпорация “Дашков и К”, 2003. – 348 с.
  86. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учебник для вузов. 4-е изд. / Е.С. Вентцель. – Москва: Наука, 1969. – 576с.
  87. Gast M.S. 802.11® Wireless Networks: The Definitive Guide, Second Edition. / M.S. Gast. – O’Reilly Media, 2005. – 656 p.
  88. Faria D.B. Modeling Signal Attenuation in IEEE 802.11 Wireless LANs / D.B. Faria // Stanford University : Technical Report TR-KP06-0118. – 2005.
  89. Леонтьева О. Імітаційна модель для дослідження методу множинного доступу до фізичного середовища з коригуванням вихідних потоків станцій / О. Леонтьєва, Р. Ліскевич, К. Обельовська, З. Шпак // Тези міжнародної конференції “10-th International Modelling School of AMSE-UAPL”. Ukraine-Crimea, Alushta. – 2005.
  90. Леонтьева О. Дослідження пріоритетного підходу в доступі до фізичного середовища на MAC-підрівні / О. Леонтьєва, К. Обельовська // Вісник НУ “Львівська політехніка” : “Комп’ютерні науки та інформаційні технології”. - Львів, 2005. - 543. – С.40-45.
  91. Леонтьева О. Імітаційна модель множинного доступу до фізичного середовища безпроводних мереж / О. Леонтьєва, К. Обельовська // Тези міжнародної конференції “11-th International Modelling School of AMSE-UAPL”. Ukraine-Crimea, Alushta. – 2006.

92. Леонтьєва О. Імітаційна модель множинного доступу до фізичного середовища безпроводних мереж / О. Леонтьєва, К. Обельовська // Технічні вісті. – 2006. – 3(24). – С.51-54.
93. Леонтьєва О. Моделювання множинного доступу до фізичного середовища безпроводних мереж / О. Леонтьєва, К. Обельовська // Технічні вісті. – 2007. – 1(25)-2(26). – С.78-81.
94. Zhang W. Performance analysis of IEEE 802.11e EDCA in wireless LANs / W. Zhang, J. Sun, J. Liu, H.-B. Zhang // Journal of Zhejiang University SCIENCE A. - 2007. - 8(1). - P.18-23.
95. Семенов Ю. А. Алгоритмы телекоммуникационных сетей. В 3 частях. Часть 1. Алгоритмы и протоколы каналов и сетей передачи данных / Ю. А. Семенов. – Москва: Интернет-Университет Информационных Технологий, Бином. Лаборатория знаний, 2007. – 637 с.
96. Yin J. The Analysis of Performance of IEEE 802.11 MAC Protocol Using Markov Chain / J. Yin // IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. - 2007. - 7(12). - P.27-37.
97. Taher N.C. An Accurate Analytical Model for 802.11e EDCA under Different Traffic Conditions with Contention-Free Bursting / N.C. Taher, Y. Ghamri-Doudane, B. El Hassan, N. Agoulmine // Journal of Computer Networks and Communications. – 2011. – 24 p.
98. Wireless Pre-N Router (F5D8230-4) and Wireless Pre-N Notebook Network Card (F5D8010). Competitive Wireless LAN Performance Evaluation // Belkin Corp. : Test report. – 2004. – 204134. – 6 p.
99. Mlinarsky F. Competitive Test of Draft 802.11n Products / F. Mlinarsky // octoScope : test report. – 2007. – 20 p.
100. Леонтьєва О. Аналіз пропускних здатностей децентралізованих схем доступу до фізичного середовища безпроводних локальних мереж / О. Леонтьєва, К. Обельовська // Тези міжнародної конференції “XVII -th

- International Modelling School of AMSE-UAPL”. Ukraine-Crimea, Alushta. – 2012.
101. Leontyeva O. Performance Analysis of IEEE 802.11 EDCA for a Different Number of Access Categories and Comparison with DCF / O. Leontyeva, K. Obelovska // Computer Networks: 20th International Conference, CN 2013, Lwowek Slaski, Poland, June 17-21, 2013: Proceedings (Communications in Computer and Information Science). – 2013. – 370. – P.95-104.
  102. Goldsmith A. Wireless Communications / A. Goldsmith., 2005.
  103. Medianet Reference Guide [Електронний ресурс] // Cisco. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: [http://www.cisco.com/en/US/docs/solutions/Enterprise/Video/Medianet\\_Ref\\_Gd/medianet\\_DG.pdf](http://www.cisco.com/en/US/docs/solutions/Enterprise/Video/Medianet_Ref_Gd/medianet_DG.pdf).
  104. Панова О.С. Дослідження впливу співвідношення типів трафіків на продуктивність роботи безпроводної мережі / О.С. Панова, К.М. Обельовська, Р.І. Ліскевич // Збірник наукових праць Національної академії наук України Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова : Моделювання та інформаційні технології. – 2014. – 73. – С.121-126.
  105. Панова О. Аналіз та вдосконалення методів доступу до фізичного середовища в безпроводних комп'ютерних мережах / О. Панова, К. Обельовська // Тези XI Міжнародної наукової конференції “Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту” (ISDMCI'2015), 25-28 травня, 2015, Залізний порт, Україна. – 2015. – С.130-132.
  106. Панова О. Аналіз критеріїв для адаптивного управління числом категорій доступу схеми EDCA / О. Панова, К. Обельовська // 7 Українсько-польська науково-практична конференція “Електроніка та Інформаційні Технології” (ЕлІТ-2015), 27-30 серпня 2015, Львів, Чинадієво, Україна. – 2015.

107. Panova O. An Adaptive ACs Number Adjusting Algorithm for IEEE 802.11 EDCA / O. Panova, K. Obelovska // Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2015), September 24-26, 2015, Warsaw, Poland/IEEE Catalog Number: CF11803-PRT. – 2015 – 2. – P.823-826..
108. Panova O. On possibility to detect network load burst on MAC-layer of wireless networks / O. Panova, K. Obelovska // International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology. – 2016. – 5(6). – P.2090-2093.



## **Додатки**

**Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження**

INSTYTUT INFORMATYKI TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

44-100 Gliwice, ul. Bałtycka 5, NIP 631-011-22-45  
tel. +48 32 231 73 19, fax 231 70 26, REGON 000564702



Gliwice, 01.07.2014 .

### Research implementation statement

The results of the PhD thesis of Leontyeva Olga about performance analysis of IEEE 802.11 MAC protocols in wireless networks were used for investigations within the scope of grant NCN 4796/B/T02/2011/40 "Modele dynamiki transmisji, sterowania zatłoczeniem i jakością usług w Internecie" (Models of transmission dynamics, congestion control and quality of service in Internet).

Using a developed wireless network simulator, a performance analysis of various wireless access schemes under different conditions was done. Possibilities for increasing of total performance of a wireless network were considered. The main results of this study were presented at the "20th International Science Conference: Computer Networks - CN2013" and published in "Computer Networks" in series CCIS Vol. 370 (ISSN 1865-0929), Springer-Verlag.

DYREKTOR INSTYTUTU

*T. Czachórski*  
Prof. dr hab. inż. Tadeusz Czachórski

prof. Tadeusz Czachórski  
Director of Institute of Theoretical and Applied Informatics  
Polish Academy of Sciences  
www.iitis.pl  
44-100 Gliwice, ul. Bałtycka 5, Poland  
tel. + 4832 231.73.19 ext. 213 or 100, mobile +48 504.238.235  
fax + 4832 231.70.26  
e-mail: tadek@iitis.pl

INSTYTUT INFORMATYKI  
TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK  
44-100 GLIWICE ul. Bałtycka 5  
tel./fax 032/ 231-70-26 tel 032/ 231-73-19

office@iitis.gliwice.pl  
http://www.iitis.gliwice.pl

Переклад українською мовою з польської та англійської

Інститут теоретичної та прикладної інформатики

Польська Академія Наук  
44-100 Глівіце, вул. Балтійська, 5, НП 631-011-22-45  
Тел. +48 32 2317319, факс 2317026, РЕГОН 000564702

[Логотип інституту]

Глівіце, 01.07.2014р.

### Звіт про виконання дослідження

Результати докторської дисертації Леонтьєвої Ольги про аналіз продуктивності MAC-протоколів в бездротових мережах IEEE. 802.11 були використані для досліджень в рамках гранту NCN 4796/B/T02/2011/40 «Моделі динаміки передачі, управління перевантаженням і якості послуг в мережі Інтернет» ("Modele dynamiki transmisji, sterowania zatłoczeniem i jakością usług w Internecie").

За допомогою розробленого симулятора безпроводної мережі було проаналізовано ефективність різних схем бездротового доступу в різних умовах. Були розглянуті можливості для підвищення загальної продуктивності бездротової мережі. Основні результати цього дослідження були представлені на «20-й Міжнародній науково-практичній конференції: Комп'ютерні мережі – CN2013» та опубліковані в журналі "Computer Networks" в серії CCIS (Комп'ютерні комунікації та інформаційні системи), том 370 (ISSN 1865-0929), видавництво Springer-Verlag.

[Штамп:]

Директор інституту  
Професор Тадеуш Чахурскі  
/нерозбірливий підпис/

Професор Тадеуш Чахурскі  
Директор Інституту теоретичної та прикладної інформатики  
Польська академія наук  
[www.iitis.pl](http://www.iitis.pl)  
44-100 Глівіце, вул. Балтійська, 5, Польща  
Тел.: +4832 231.73.19 дод. 213 або 100, моб: +48 504.238.235  
Факс: +4832 231.70.26  
E-mail: [tadek@iitis.pl](mailto:tadek@iitis.pl)

[Штамп:]

Інститут теоретичної та  
прикладної інформатики  
Польська академія наук  
44-100 Глівіце, вул. Балтійська, 5  
Тел/факс 032/231-70-26,  
тел 032/231-73-19

Переклад українською мовою з польської вірний, та відповідає оригіналу  
Перекладач Левицька-Ревуцька Ольга Євгенівна

Підпис перекладача: \_\_\_\_\_

Переклад українською мовою з англійської вірний та відповідає оригіналу.

Перекладач: Завадка Оксана Богданівна

Підпис перекладача: \_\_\_\_\_

INSTYTUT INFORMATYKI TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

44-100 Gliwice, ul. Bałtycka 5, NIP 631-011-22-45  
tel. +48 32 2317319, fax 2317026, REGON 000564702



Gliwice, 01.07.2014.

### Research implementation statement

The results of the PhD thesis of Leontyeva Olga about performance analysis of IEEE 802.11 MAC protocols in wireless networks were used for investigations within the scope of grant NCN 4796/B/T02/2011/40 "Modele dynamiki transmisji, sterowania zatłoczeniem i jakością usług w Internecie" (Models of transmission dynamics, congestion control and quality of service in Internet).

Using a developed wireless network simulator, a performance analysis of various wireless access schemes under different conditions was done. Possibilities for increasing of total performance of a wireless network were considered. The main results of this study were presented at the "20th International Science Conference: Computer Networks - CN2013" and published in "Computer Networks" in series CCIS Vol. 370 (ISSN 1865-0929), Springer-Verlag.

DYREKTOR INSTYTUTU

*Tadeusz Czachórski*  
Prof. dr hab. inż. Tadeusz Czachórski

prof. Tadeusz Czachórski  
Director of Institute of Theoretical and Applied Informatics  
Polish Academy of Sciences  
www.iitis.pl  
44-100 Gliwice, ul. Bałtycka 5, Poland  
tel. + 4832 231.73.19 ext. 213 or 100, mobile +48 504.238.235  
fax + 4832 231.70.26  
e-mail: tadek@iitis.pl

INSTYTUT INFORMATYKI  
TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK  
44-100 GLIWICE ul. Bałtycka 5  
tel./fax 032/ 231-70-26 tel 032/ 231-73-19

office@iitis.gliwice.pl  
http://www.iitis.gliwice.pl



ТзОВ «УКРАЇНСЬКІ ПРОМИСЛОВІ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ»

Україна, 79015, Львів,  
вул. Смаль-Стоцького, 1  
тел.: +38 (032) 297-71-89  
ел. пошта: [info@uptc.com.ua](mailto:info@uptc.com.ua)



LCC "UKRAINIAN INDUSTRIAL  
TELECOMMUNICATIONS"

Ukraine, 79015, Lviv,  
Smal'-Stoc'kogo str. 1  
phone: +38(032) 297-71-89  
e-mail: [info@uptc.com.ua](mailto:info@uptc.com.ua)

Вих. № 02/11

“11” травня 2016р.

**АКТ**  
**використання результатів дисертаційної роботи**  
**Панової Ольги Сергіївни «Методи та моделі управління доступом**  
**до фізичного середовища безпроводних комп'ютерних мереж»**

В рамках планування та розгортання комп'ютерних безпроводних мереж в ТзОВ "Українські промислові телекомунікації" використано такі результати дисертаційної роботи Панової Ольги Сергіївни:

- Програмний комплекс імітаційної моделі MAC-підрівня безпроводної мережі;
- методику оцінки стану завантаженості безпроводної мережі на основі аналізу значень часу доставки кадрів.

Це дало можливість оптимізувати процес планування мережі та з високою точністю і ступенем деталізації аналізувати продуктивність безпроводної мережі, враховуючи її конструктивні особливості та умови експлуатації.

Технічний директор

ТзОВ «Українські промислові телекомунікації» /Ліскевич Р.І./



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

проректор з науково-педагогічної роботи  
 Національного університету  
 «Львівська політехніка»



доц. Давидчак О.Р.

« 15 жовтня 2010 » р.

**АКТ**

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи  
 аспірантки Панової Ольги Сергіївни на тему  
 «Методи та моделі управління доступом до фізичного середовища  
 безпроводних комп'ютерних мереж»  
 представленої до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата технічних  
 наук

Комісія у складі: директора ІКНІ, д.т.н., проф. Медиковського М.О.,  
 завідувача кафедри автоматизованих систем управління (АСУ) д.т.н., проф.  
 Цмоця І.Г., доцента кафедри автоматизованих систем управління (АСУ) к.т.н.,  
 доц. Цимбала Ю.В., склала даний акт в тому, що у навчальному процесі  
 кафедри АСУ Національного університету «Львівська політехніка» для  
 студентів магістерського рівня підготовки спеціальності 8.05010101  
 „Інформаційні управляючі системи та технології” використовуються результати  
 дисертаційних досліджень аспірантки кафедри АСУ Панової Ольги Сергіївни  
 на тему «Методи та моделі управління доступом до фізичного середовища  
 безпроводних комп'ютерних мереж».

Результати дисертаційних досліджень Панової О.С. використовуються у  
 дисципліні “Цифрові мережі наступного покоління” в розділі „Забезпечення  
 якості сервісів в мережах наступного покоління”. При вивченні теми „Якість  
 обслуговування в безпроводних комп'ютерних мережах” використано  
 розроблений метод адаптивного управління кількістю категорій доступу для  
 мереж стандарту IEEE 802.11, що дозволяє підвищити ефективність підрівня  
 доступу до фізичного середовища.

Ефект від використання результатів дисертаційної роботи Панової О.С.  
 полягає у вивченні майбутніми фахівцями методів вдосконалення сучасних  
 безпроводних комп'ютерних мереж.

**Голова комісії:**

директор ІКНІ,  
 д.т.н., проф.

Медиковський М.О.

**Члени комісії:**

завідувач каф. АСУ  
 д.т.н., проф.

Цмоць І.Г.

доц. каф. АСУ,  
 к.т.н., доц.

Цимбал Ю.В.