

АНАЛІЗ ВПЛИВУ АДАПТИВНОЇ ЗМІНИ ЧИСЛА КАТЕГОРІЙ ДОСТУПУ СХЕМИ EDCA НА ЧАСОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ

© Панова О., Обельовська К. М., 2015

Запропоновано адаптивний метод зміни числа категорій доступу для схеми EDCA. Алгоритм передбачає накопичення статистичних даних про передавання кадрів в буфері станції, їх аналіз та зміну числа категорій доступу на основі результатів аналізу. Було показано, що, використовуючи запропонований адаптивний алгоритм доступу до фізичного середовища, можна покращити загальну продуктивність безпроводної мережі. Результати дослідження за допомогою імітаційного моделювання показали, що найефективніші результати підвищення продуктивності безпроводної мережі досягаються за умов її великого розміру та присутності інтенсивного трафіку.

Ключові слова: безпроводні мережі, IEEE 802.11, MAC-підрівень, EDCA, адаптивна зміна кількості АС.

In this paper an adaptive ACs (Access Categories) number adjusting algorithm for the EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) scheme is proposed. It has been shown that the total performance of the wireless network can be enhanced especially under the highly loaded network conditions. It has been introduced as a result of collecting a data buffer and the switching mechanism for AC queues. The simulation results demonstrate that the proposed adaptive ACs number adjusting algorithm for the EDCA scheme outperforms significantly the 802.11 specification. This outperformance of wireless network is observed under the large network size and high network load.

Key words: wireless networks, IEEE 802.11, medium access control, EDCA, adaptive ACs number adjusting.

Вступ. Загальна постановка проблеми

Ефективність функціонування безпроводних комп'ютерних мереж залежить від багатьох чинників, серед яких важливе місце займає метод доступу до фізичного середовища. Він реалізується на підрівні MAC (Medium Access Control) доступу до фізичного середовища архітектури комп'ютерних мереж. У найпоширеніших безпроводних мережах WiFi [1] доступ станцій до середовища здійснюється на конкурентній основі з використанням множинного методу з прослуховуванням несучої та недопущенням колізій CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance). Для реалізації методу використовується частина пропускної здатності мережі, а отже, пропускна здатність мережі, що може бути використана для передавання трафіку абонентів, зменшується. Наприклад, за швидкості 216 Мбіт/с та використання кадрів розміром 1 Кбайт і передавання згідно з протоколом IEEE 802.11 (при цьому використовуючи параметри фізичного рівня, закладені в IEEE 802.11n) пропускна здатність обмежена згори значенням 40 Мбіт/с [2]. Безперечно, це негативно впливає на експлуатаційні характеристики безпроводної мережі, а отже, задача вдосконалення методів доступу до фізичного середовища в безпроводних комп'ютерних мережах є актуальною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Відомо багато досліджень, присвячених покращенню протоколів підрівня MAC [3–26]. Розробники стандарту IEEE 802.11n підвищують ефективність протоколу MAC-підрівня за допомогою агрегування кадрів [4], фактично збільшуючи довжини кадрів, які передаються по

каналу, залишаючи алгоритм вирішення конфліктів без змін. Для визначення оптимальної довжини агрегованого кадру залежно від швидкості передавання та рівня завад можна використовувати алгоритм [5] на основі даних про попереднє передавання кадру. За умови ненасиченої завантаженості мережі, коли час між надходженням наступного кадру до черги та передаванням попереднього кадру є доволі великий, алгоритм працюватиме неефективно, оскільки за цей час стан безпровідного 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 агрегація значно ефективніші за A-MSDU агрегацію [6]. Однією з причин меншої ефективності A-MSDU агрегації є те, що високопріоритетні кадри (голос та кадри управління) мають невеликий розмір (80–256 байт) [7], в результаті агрегації отримуємо кадр невеликого розміру та неефективне використання каналу [6]. Збільшити ефективність використання каналу можна, ввівши додаткові затримки перед отриманням доступу до середовища та накопичивши кадри для передавання – метод DCA (Delayed Channel Access) [8]. Згідно з DCA доступ до середовища відкладається доти, доки в черзі не назбирається визначене число σ кадрів, чи не мине очікувальний часовий проміжок τ з моменту надходження до черги першого кадру, чи доки час з моменту надходження в чергу останнього кадру меншим від часу λ , необхідного для доступу до середовища. Пізніше в DCA було додано динамічну зміну параметра σ залежно від розміру черги та інтенсивності надходження кадрів до черги [9]. Також була запропонована функція [10], яка залежно від пріоритету кадру та значення параметра λ відправляє кадр або одразу на передавання, або в чергу для агрегації. І сам алгоритм DCA, і його модифікації підвищують ефективність використання каналу та, одночасно, збільшують і час очікування високопріоритетних кадрів у черзі, що є небажаним, оскільки, наприклад, затримка кадрів голосового потоку понад 200 мс спричиняє дискомфорт сприйняття мови співбесідника [7]. Зовсім інший підхід до оптимізації процесу агрегації запропоновано у [11], де кадри поділяються не лише за класом доступу, а й за адресою. Спеціальний вказівник за довжиною черги, чи випадково, чи згідно з якимось іншим алгоритмом 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 під час їх передавання.

Досліджуючи вплив зміни різних MAC/PHY параметрів на пропускну здатність мережі [12], можна відзначити, що найвагомійший вплив на верхню межу пропускну здатності має довжина слоту часу SlotTime. Оскільки SlotTime є часом, необхідним для оцінки зайнятості каналу, та обумовлюється особливостями фізичного рівня, то цей параметр фактично не піддається зниженню. Проте SlotTime можна спробувати реорганізувати. Так у [13] запропонували поділити SlotTime на слот для передавання даних та управляючий слот, який своєю чергою складається з набору міні-слотів. За допомогою управляючого слоту з числа станцій, присутніх у мережі залежно від довжини їх черги, обираються ті, яким буде надана можливість конкуренції за доступ до середовища, решта ж станцій залишаються у стані очікування. Інтервал відтермінування передавання кадру (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 вилучається 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 стандарт 802.11 потребує значних змін і на MAC-підрівні, і на фізичному рівні.

Найбільші затримки під час передавання кадрів вносить алгоритм вирішення конфліктів, а саме – мінімальне вікно конкуренції CW_{\min} [12], тому багато робіт присвячено підвищенню пропускну здатності та зменшенню затримок передавання кадрів за рахунок поліпшення алгоритму вирішення конфліктів. Алгоритми динамічної зміни мінімального вікна конкуренції запропоновано у [14–16] для схеми доступу DCF (Distributed Coordination Function) та у [17–19] для схеми доступу EDCA. Для визначення оптимального значення CW пропонують враховувати кількість повторних

спроб передавання [14, 16, 17, 19], кількість активних станцій [14–16, 19], відстань до точки доступу [15], діапазон значень вікна конкуренції [15], число відправлених кадрів [17], клас доступу [17, 19], відстань поточного значення CW до його мінімального CW_{\min} та максимального CW_{\max} значень [18]. При цьому усі алгоритми визначення оптимального значення вікна конкуренції збільшують ефективність роботи мережі лише за умов її насиченості, в іншому випадку можуть навіть погіршувати роботу мережі [20].

Іншим підходом до покращення алгоритму вирішення конфліктів є заміна експоненційного збільшення вікна конкуренції на лінійне [21, 22] або застосування різних коефіцієнтів збільшення розміру вікна конкуренції [18, 23]. Ще більше радикальні зміни запропоновано у [24], де CW приймає лише три значення: 31, 63, 127. При цьому вводиться додатковий лічильник $TURN$, який залежить від CW та може приймати значення відповідно 3, 2, 1. Лічильник $TURN$ вмикається в момент, коли лічильник зворотного відліку дорівнює 0. Якщо протягом відліку $TURN$ середовище залишається вільним, то станція розпочинає передавати кадр. Такий алгоритм дозволяє уникнути колізій між кадрами, які одночасно закінчили відлік backoff, та надає перевагу в передаванні кадрів, який попадає 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 [25]. Для визначення довжини TXOP береться до уваги довжина черги та розмір наступного кадру категорії доступу AC. У [26] 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 передавання залежно 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 [26] передбачено, що обчислені оптимальні значення MAC-параметрів для кожного класу доступу AC точки доступу будуть на рівень менші, ніж для аналогічного класу доступу станції.

Для формулювання адаптивного методу доступу до фізичного середовища ми виконали порівняльний аналіз схем DCF, що не підтримує QoS, та EDCA, яка QoS підтримує [27]. За допомогою аналітичного та імітаційного моделювання проаналізовано пропускну здатність мереж з децентралізованою схемою доступу DCF та розширеним доступом EDCA. Показано, що забезпечення пріоритетного доступу схемою EDCA для мереж, що мають п'ять і більше станцій, призводить до зменшення загальної пропускну здатності мережі.

У [28] наведено аналіз ефективності схеми EDCA стандарту 802.11 залежно від кількості категорій доступу (кількості пріоритетів трафіку). Вплив різних кількостей категорій доступу досліджений при ненасиченому і насиченому станах мережі. Аналіз показав, що загальна пропускну здатність мережі, що працює за схемою EDCA, залежить від числа категорій доступу, зменшення яких може поліпшити загальну пропускну здатність мережі.

Як було показано вище, всі досліджені методи покращення MAC-підрівня безпроводних мереж мають свої недоліки та не були впроваджені в нових специфікаціях стандарту.

Формування мети

Метою статті є покращення експлуатаційних характеристик мережі за допомогою адаптивного алгоритму перемикання числа категорій доступу залежно від вхідного трафіку. У цій роботі досліджено, як саме вплине використання адаптивного алгоритму на часові показники MAC-підрівня.

Аналіз отриманих наукових результатів

Опис схем доступу DCF та EDCA

Базовою схемою управління доступом в мережах стандарту IEEE 802.11a,b,g є схема розподіленого управління DCF (Distributed Coordination Function).

Відповідно до DCF, перш ніж станція починає передавати, вона прослуховує безпроводне середовище та аналізує його стан. Якщо станція не відчуває ніякого передавання в каналі, то вона

розглядає такий стан каналу як вільний, в іншому випадку – як зайнятий. Якщо середовище вільне протягом міжкадрового проміжку часу DIFS (Distributed InterFrame Space), станція розпочинає передавати кадр. Інакше станція ініціалізує інтервал відтермінування передавання кадру vackoff. Значення лічильника відтермінування (BoF) вибирається рівномірно і випадково в діапазоні $[0, CW]$, де CW – розмір вікна конкуренції. Станція, очікуючи, зменшує значення лічильника лише у тому випадку, якщо середовище є вільним. Якщо лічильник відтермінування стає 0 і середовище протягом інтервалу DIFS все ще є вільним, то станція отримує право розпочати передавати кадр. Якщо ж середовище зайняте, то станція відкладає передавання кадру на випадковий період часу. У разі успішного передавання приймач після короткого міжкадрового інтервалу SIFS (Short InterFrame Space) передає позитивний кадр-підтвердження (ACK). Якщо під час передавання кадру відбулась колізія, станція збільшує вдвічі розмір вікна конкуренції CW та вибирає нове значення лічильника відтермінування. Отже, тільки одна станція може успішно передавати в мережу в певний момент часу.

DCF не передбачає аналізу типу трафіку і будь-який трафік обслуговує однаково. У мережах стандарту IEEE 802.11n реалізовано покращений розподілений доступ до каналу EDCA. Схема EDCA, на відміну від базової схеми DCF, аналізує тип трафіку, ділить його на чотири класи і по-різному обслуговує кожен з них. З цією метою в EDCA визначено чотири категорії доступу AC (Access Categories), кожна з яких характеризується власною множиною параметрів доступу та пріоритетом доступу до фізичного середовища.

Для кожної категорії доступу існує своя черга передавання 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 0, то внутрішня колізія вирішується наданням права на передавання кадру з найвищим пріоритетом, решта кадрів опрацьовується як при виникненні зовнішньої колізії. У такий спосіб трафік з вищим пріоритетом має вищий шанс бути відісланим, ніж трафік з нижчим пріоритетом.

Також для кожної категорії доступу визначено обмежений проміжок TXOP (Transport Opportunity), протягом якого станція може надсилати будь-яку кількість кадрів, доки цей проміжок не закінчиться. При цьому тривалість передавання не повинна перевищувати максимальний розмір проміжку TXOP. Якщо кадр за тривалістю передавання не вміщується в один виділений TXOP, тоді кадр необхідно розбити на менші за розміром кадри. Використання проміжків TXOP зменшує затримки [3], пов'язані з боротьбою за доступ до середовища для передавання наступного кадру.

У табл. 1 наведено набір параметрів MAC-підрівня для схеми EDCA залежно від категорії доступу [1].

Таблиця 1

Параметри MAC-підрівня для категорій доступу

	AC0 (AC_BK)	AC1 (AC_BE)	AC2 (AC_VI)	AC3 (AC_VO)
CW _{min}	CW_{min}	CW_{min}	$(CW_{min}+1)/2 - 1$	$(CW_{min}+1)/4 - 1$
CW _{max}	CW_{max}	CW_{max}	CW_{min}	$(CW_{min}+1)/2 - 1$
AIFS	7	3	2	2
TXOP (мкс)	0	0	3008	1504

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 під час передавання функціонуватиме згідно зі спрощеною моделлю станів, зображеною на рис. 1.

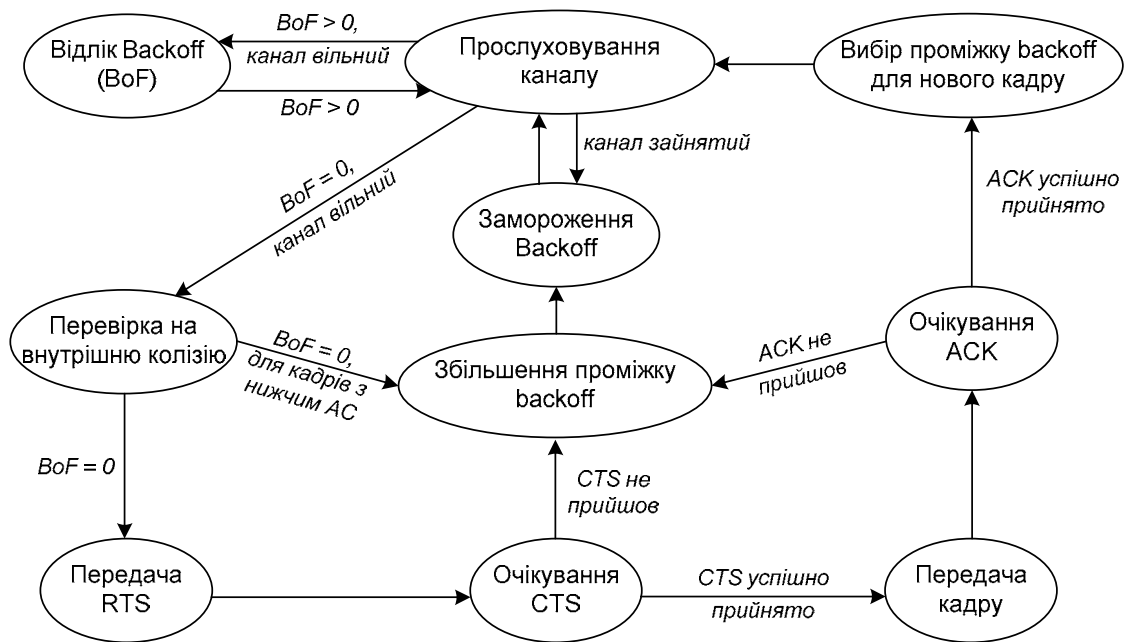


Рис. 1. Спрощена модель станів безпроводної станції на MAC-підрівні

Отже, важливим завданням є розробка ефективного протоколу MAC-підрівня, який дозволяє отримати високу пропускну здатність і низьку затримку для кінцевого користувача при роботі в безпроводній мережі.

Адаптивний метод доступу до фізичного середовища та його вплив на часові показники MAC-підрівня

Ми припустили, що кожна станція або точка доступу бездротової мережі має внутрішній буфер певного розміру для збору параметрів передавання кадру. У нашому дослідженні в буфері зберігається середнє значення затримки кадру (середній час доставки кадру) визначене на певному інтервалі часу – інтервалі накопичення. На основі аналізу зібраних затримок кадрів станції або точки доступу можна оцінити рівень навантаження в мережі. Залежно від рівня мережевого навантаження адаптивний алгоритм вибирає кількість категорій доступу AC, які будуть забезпечуватися в подальшій роботі мережевих пристроїв.

Для оцінки рівня завантаження мережі ми порівнюємо середнє арифметичне значення затримки кадрів з отриманих поточних даних та середнє значення, яке використовується в якості базового. Зміна співвідношення цих величин може слугувати індикатором для прийняття рішень при адаптивній схемі управління доступом у мережі. Назвемо його індикатором зміни. Якщо індикатор зміни більше/менше, ніж деяке порогове значення, то станція або точка доступу зменшує/збільшує кількість категорій доступу AC і встановлює отримане поточне середнє арифметичне значення в якості нового базового значення.

У цій роботі ми оцінили вплив запропонованого адаптивного перемикавання кількості категорій доступу на середній час доставки кадрів у мережі.

Дослідження проводились за допомогою розробленого нами симулятора [29, 30], в якості об'єкта дослідження була вибрана безпроводна мережа, що функціонувала в режимі Infrastructure Mode. У режимі Infrastructure Mode усі станції мережі обслуговуються за допомогою точки доступу, яка слугує проміжним вузлом під час передавання кадрів між станціями. У дослідженні розглядалися три класи мереж, кожна з яких відповідно обслуговувала 2, 10 та 30 станцій, що, своєю чергою, відповідає малим, середнім та великим розмірам мережі. Експерименти проводили для різних значень статистичних інтервалів накопичення середніх значень затримок кадрів та індикаторів зміни. Інтервал накопичення середніх значень затримки кадрів становив 5, 10 або 15 секунд, а індикатор зміни – 1.3, 1.5 або 2.

Розглянемо зміну середнього часу доставки кадру в мережі для даного експерименту (рис. 2). Для мережі з 2 станцій (рис. 2, а) та при завантаженості > 80–100 % середня затримка кадру для схем з адаптивним вибором числа категорій доступу становить 20–35 мс, що в середньому на 20–23 % нижче, ніж для стандартної схеми EDCA з 4 категоріями доступу. Для високої завантаженості (> 100 %) ця різниця для деяких схем з адаптивним вибором числа категорій доступу становить ≈ 35 мс, тобто середній час доставки більше ніж вдвічі нижчий за значення середнього часу доставки для стандартної схеми EDCA з 4 категоріями доступу. Найнижчі значення середнього часу доставки в діапазоні завантажених > 70 % забезпечуються адаптивною схемою при використанні статистичного інтервалу накопичення в 5 секунд та індикатора зміни 1.5.

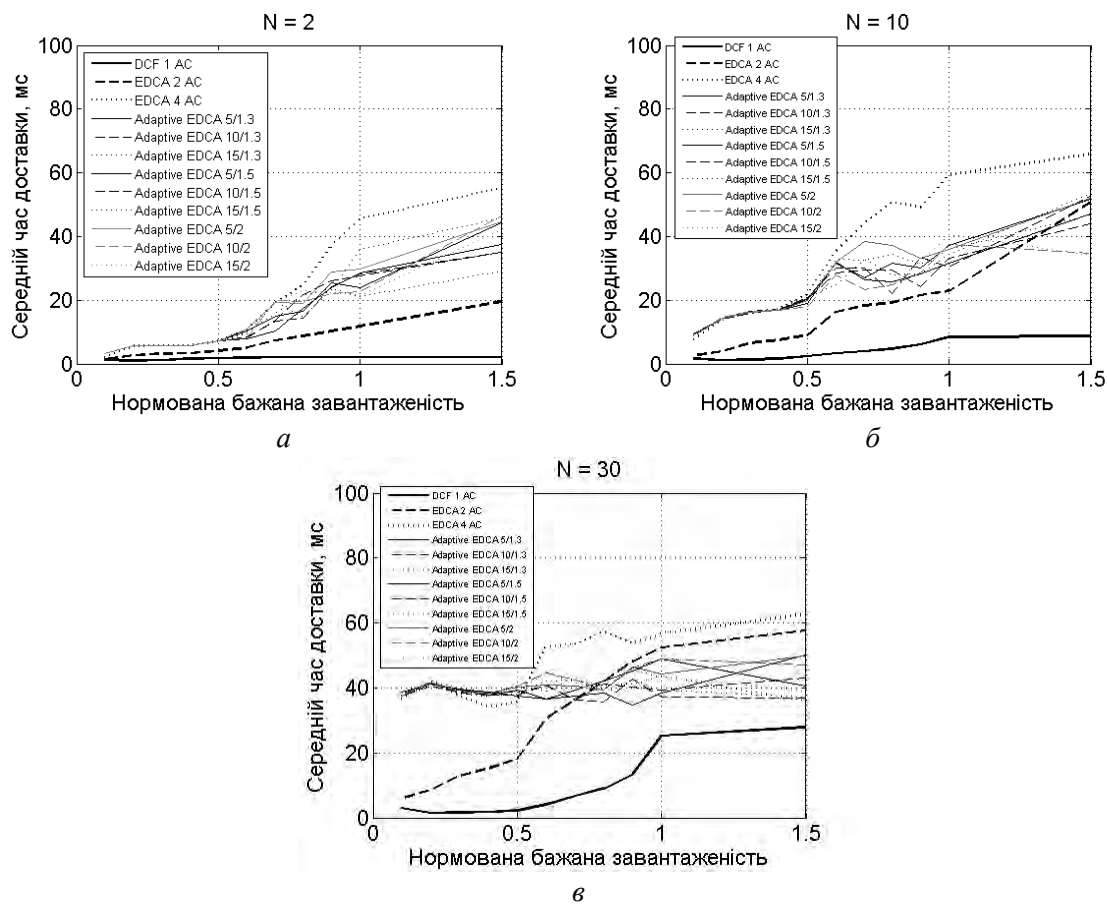


Рис. 2. Середній час доставки кадру для мережі:
а – з двома станціями; б – з 10-ма станціями; в – з 30-ма станціями

Для мережі середнього розміру (рис. 2, б) при завантаженості > 50 % середній час доставки кадру для адаптивних схем є нижчим на 40–42 %, ніж для стандартної схеми EDCA. У діапазоні завантаженості 50–90 % найнижчі показники середнього часу доставки отримано для адаптивної схеми зі статистичним інтервалом накопичення, що дорівнює 10 та 15 с з індикатором зміни 1.5 та для інтервалу в 5 секунд з індикатором зміни 1.3. У разі 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 секунд та індикатором зміни 1.5 середній час доставки кадру на 20 % нижчий, ніж середній час доставки для схеми EDCA з двома категоріями доступу.

У випадку великої мережі (рис. 2, в) отримуємо схожий результат – середній час доставки для адаптивних схем нижчий на ≈ 30 %, ніж для стандартної схеми EDCA з 4 категоріями доступу. Найкращі результати отримуємо для адаптивної схеми зі статистичним інтервалом 10 та 15 с і індикаторами зміни 1.3 та 1.5. Якщо завантаженість мережі стає насиченою, то середній час

доставки кадру для адаптивних схем є нижчий у середньому на 25 %, ніж для схеми EDCA з 4 категоріями доступу. Тобто, схема доступу з адаптивним вибором числа категорій доступу є доволі ефективною для високих значень завантаженості мережі і при цьому дозволяє зберегти пріоритетне обслуговування різних типів трафіку.

Висновки і перспективи подальших наукових розвідок

1. Розроблено адаптивний алгоритм для регулювання кількістю категорій доступу в схемі EDCA, який у великих мережах (у цій роботі досліджувалась мережа з 30 станцій) при високих значеннях бажаної завантаженості мережі (> 60 %) дозволяє знизити середню затримку кадру до 30–40 %. Також було показано, що зниження середньої затримки кадру дозволяє краще забезпечувати якість обслуговування пріоритетного трафіку в умовах завантаженої мережі.

2. Досліджено, що найефективніша робота запропонованої схеми з адаптивною зміною числа категорій доступу забезпечується при використанні короткого статистичного інтервалу накопичення (5–10 с) та індикатора зміни в діапазоні 1.3–1.5.

3. Розроблений адаптивний алгоритм дозволяє підвищити загальну пропускну здатність і продуктивність безпровідної мережі з високопріоритетним трафіком.

4. Визначення залежності між параметрами адаптивного алгоритму та продуктивністю модифікованої схеми EDCA можуть бути вивчені в майбутніх роботах.

1. *IEEE Std 802.11TM-2007, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Std.*, 2007. 2. Li, T., Ni, Q., Malone, D., Leith, D., Xiao, Y., Turletti, T., *A new MAC scheme for very high-speed WLANs // IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), Buffalo-NY, USA, June 2006.* – P. 171–180. 3. Choi, S., Prado, J., Shankar, S., Mangold, S., *IEEE 802.11e Contention-Based Channel Access (EDCF) Performance Evaluation // Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Anchorage, Alaska, May 2003.* – P. 1151–1156. 4. Perahia E., Stacey R., *Next Generation Wireless LANs: Throughput, Robustness, and Reliability in 802.11n.* – Cambridge University Press, 2008. – 416 с. 5. Ci, S., Sharif, H., *Adaptive Optimal Frame Length Predictor for IEEE 802.11 Wireless LAN // Proceedings of 6th International Symposium on Digital Signal Processing for Communication Systems 2002.* – P. 59–63. 6. Skordoulis, D., Ni, Q., Ali, U., Hadjinicolaou, M., *Analysis of Concatenation and Packing Mechanisms in IEEE 802.11n // PGNET 2007, Liverpool, UK, June 2007.* 7. Bansal, A., *Mandating QoS in Wireless LANs: White Paper.* – NewLogic Technologies, 2005. – http://www.newlogic.com/products/802_11_wireless_abg/mandating_qos_in_wireless_lans.pdf. 8. Changwen, L., Stephens, A. P., *Delayed Channel Access for IEEE 802.11e Based WLAN // IEEE International Conference on Communication, June 2006.* – P. 4811–4817. 9. Skordoulis, D., Ni, Q., Min, G., Borg, K., *Adaptive delayed channel access for IEEE 802.11n WLANs // Proceedings of the IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications (ICCSC2008), May 26–28, 2008, Shanghai, China.* – P. 167–171. 10. Skordoulis, D., Ni, Q., Zarakovitis, C., *A selective delayed channel access (SDCA) for the high-throughput IEEE 802.11n // Proceedings of the 2009 IEEE conference on Wireless Communications & Networking Conference, Budapest, 5–8 April 2009.* – P. 1–6. 11. Lin, Y. S., Wang, J. Y., Hwang, W. S., *Scheduling Mechanism for WLAN Frame Aggregation with Priority Support // Proceedings of the 2006 Joint Conference on Information Sciences, JCIS 2006, Kaohsiung, Taiwan, ROC, October 8–11, 2006.* – P. 844–847. 12. Ni, Q., Li, T., Turletti, T., Xiao, Y., *AFR Partial MAC Proposal for IEEE 802.11n // IEEE 802.11n Working Group Document: IEEE 802.11-04-0950-00-000n, August 13, 2004.* 13. Ni, J., Srikant, R., *Distributed CSMA/CA Algorithms for Achieving Maximum Throughput in Wireless Networks // 2009 Information Theory and Applications Workshop (ITA), San Diego, California, February 2009.* 14. Cali, F., Conti, M., Gregori, E., *IEEE 802.11 Protocol: Design and Performance Evaluation of an Adaptive Backoff Mechanism // IEEE Journal on Selected Areas in Communications.* – 2000. – 18(9). – P. 1774–1786. 15. Kim, Y.-D., Kang, W.-S., Lee, D.-H., Yu, J.-H., *Distance Adaptive Contention Window Mechanism for Wireless Sensor Networks // 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. 16. Bononi, L., Conti, M., Gregori, E., *Design and Performance Evaluation of an Asymptotically Optimal Backoff Algorithm for IEEE 802.11 Wireless LANs* // *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, Hawaii, January 4–7, 2000*. 17. Vittorio, S., Bello, L.L., *An Approach to Enhance the QoS Support to Real-Time Traffic on IEEE 802.11e Networks* // *In 6th International WORKSHOP On Real Time Networks, Jul. 2007*. 18. Naoum-Sawaya, J., Ghaddar, B., Khawam, S., Safa, H., Artail, H., Dawy, Z., *Adaptive Approach for QoS Support in IEEE 802.11e Wireless LAN* // *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. 19. Jang, K.-W., *A New Backoff Algorithm to Guarantee Quality of Service over IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks* // *Wireless On-Demand Network Systems: Lecture Notes in Computer Science*. – 2004. – 2928. – P.77–86. 20. Baroudi, U., Mohiuddin, A.M., *Performance analysis of Internet applications over an adaptive IEEE 802.11 MAC architecture* // *Journal of the Franklin Institute*. – 2006. – 343(4–5). – P. 352–360. 21. Xu, D., Sakurai, T., Vu, H.L., *An Analysis of Different Backoff Functions for an IEEE 802.11 WLAN* // *Proceedings of the 68th Semi-Annual IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2008-Fall, Calgary, Canada, 21-24 September 2008*. – P.1-5. 22. Vitsas, V., *Throughput analysis of linear backoff scheme in wireless LANs* // *Electronics Letters*. – 2003. – 39(1). – P. 99–100. 23. Xu, D., Sakurai, T., Vu, H.L., *An Access Delay Model for IEEE 802.11e EDCA* // *IEEE Transactions on Mobile Computing*. – 2009. – 8(2). – P. 261–275. 24. Jangid, A.K., Sharma, N., *Modified DCF for Throughput Enhancement in WLAN* // *Proceedings of the 14th National Conference on Communications, February 01–03, 2008, Bombay, Mumbai*. 25. Zhao, Y., Liu, H., *Adaptive EDCA Algorithm Using Video Prediction for Multimedia IEEE 802.11e WLAN* // *Proceedings of the Second International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'06)*. – 2006. – P. 10. 26. Cano, C., Bellalta, B., Oliver, M., *Adaptive Admission Control Mechanism for IEEE 802.11e WLANs* // *The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 07), Athens, Greece, September 2007*. 27. Леонт'єва О., Обельовська К. Порівняння пропускних здатностей схем доступу dcf та edca безпроводних локальних мереж // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” № 744 “Комп’ютерні науки та інформаційні технології”*. – 2012. – pp. 64–68. 28. Leontyeva O., Obeljovska K. (2013): *Performance Analysis of IEEE 802.11 EDCA for a Different Number of Access Categories and Comparison with DCF*, *Computer Networks: 20th International Conference, CN 2013, Lwowek Slaski, Poland, June 17–21, 2013. Proceedings (Communications in Computer and Information Science)*, Vol. 370. – pp. 95–104. 29. Леонт'єва О., Обельовська К., *Імітаційна модель множинного доступу до фізичного середовища безпроводних мереж* // *Технічні вісті*. 2006/3(24). – С. 51–54. 30. Леонт'єва О., Обельовська К., *Моделювання множинного доступу до фізичного середовища безпроводних мереж* // *Технічні вісті*. – 2007, No. 1(25)–2(26). – С. 78–81.