

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Інь Ченлян**

殷承亮

УДК 004.7:654.195.6

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ  
ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ АУДІОВІЗУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ  
ЗАСОБАМИ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ IEEE 802.11**

05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

кандидат технічних наук, доцент  
**Лазебний Володимир Семенович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
доцент кафедри акустичних та мультимедійних  
електронних систем

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Квасніков Володимир Павлович**,  
Національний авіаційний університет,  
завідувач кафедри комп'ютеризованих  
електротехнічних систем та технологій,

кандидат технічних наук, доцент  
**Чичужко Марина Володимирівна**,  
Черкаський державний технологічний  
університет, доцент кафедри робототехніки та  
спеціалізованих комп'ютерних систем факультету  
інформаційних технологій і систем,

Захист відбудеться « 25 » листопада 2020 року о 13-30 годині в ауд. 6.202 (6 корпус) на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.07 Національного авіаційного університету за адресою: 03680, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03680, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

Автореферат розіслано « 22 » жовтня 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Олена ТОЛСТИКОВА

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Безпроводові локальні мережі стандарту IEEE 802.11 (Wi-Fi) набули значного поширення для передавання головним чином мультимедійної інформації. Їх застосовують як корпоративні користувачі, так і індивідуальні користувачі. Великого поширення набули безпроводові мережі доступу до інформаційних ресурсів у місцях великого скупчення людей. Такі мережі отримали назву «гарячі точки – hotspot». Розвитку безпроводових мереж сприяє те, що сучасні мобільні засоби зв'язку (телефони та планшети), а також портативні комп'ютери мають можливість з'єднання з мережею Інтернет із застосуванням радіоканалу Wi-Fi. Технологію мереж Wi-Fi постійно вдосконалюють, і вона забезпечує все більшу пропускну здатність потоків даних.

У процесі експлуатації мереж стандарту IEEE 802.11 часто виникають надмірні навантаження мережі або проблеми із забезпеченням якості наданих телекомунікаційних та інформаційних послуг. Це відбувається, через велику кількість активних користувачів, з'єднаних з однією точкою доступу, а також через те, що багато користувачів користуються послугами, пов'язаними з передаванням потокової інформації. Проблеми в роботі мережі можуть виникати також через велику щільність розміщення безпроводових мереж і їх роботу в однакових або суміжних частотних каналах.

Правильна організація мереж Wi-Fi і врахування особливостей їх функціонування сприяє максимально ефективному їх використанню та наданню якісних телекомунікаційних послуг. Тому питання, пов'язані з аналізом функціонування і прогнозуванням параметрів безпроводових мереж Wi-Fi, є на сьогоднішній день актуальними.

Цим питанням присвятили свої дослідження багато авторів. Теоретичні розрахунки пропускну здатності безпроводової мережі ґрунтуються на аналізі мережі з насиченим навантаженням, запропоновані Джузеппе Б'янкі. Зазначений підхід поширили для аналізу мереж 802.11 всіх специфікацій, однак, отримані результати мають суттєві відмінності від вимірюваних на практиці параметрів. Крім визначення пропускну здатності, для проектування безпроводової мережі необхідно вміти прогнозувати параметри якості надання телекомунікаційних послуг. Це особливо важливо, якщо послуги пов'язані з передаванням аудіовізуального контенту, чутливого до таких якісних показників як затримки, нерівномірність затримок (джитер), втрата пакетів даних.

Останнім часом частка аудіовізуальної інформації в мережах передавання даних зростає. У безпроводових мережах стандарту IEEE 802.11 це обумовлено активним під'єднанням до мережі сучасних мобільних телефонів для передавання, приймання та перегляду в реальному часі аудіовізуального контенту. Безпроводові мережі стандарту IEEE 802.11 є зручним і доступним засобом для отримання і передавання відео (відео конференції, перегляд кінофільмів, телевізійних програм, спортивних подій, відео контенту із соціальних мереж) та звукової (IP-телефонія, доступ до пісенних та концертних фонограм тощо) інформації, яка є потоковою інформацією. Такі інформаційні

потоки створюють велике навантаження на телекомунікаційну мережу, що призводить до погіршення якісних показників мережі, та унеможлиблює забезпечення якісних інформаційних послуг.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Більшу частину досліджень, висвітлених у дисертаційній роботі, здійснено згідно з планами науково-дослідної роботи кафедри звукотехніки та реєстрації інформації і Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» під час виконання міжнародної ініціативної науково-дослідної роботи «Удосконалення процесу передавання аудіовізуальної інформації засобами безпроводових мереж» (номер державної реєстрації №0117U001676), де автор брав участь як один з виконавців.

**Мета та завдання.** Метою дисертаційної роботи є удосконалення процесу передавання аудіовізуального контенту засобами безпроводових мереж IEEE 802.11 з конкурентним доступом, з урахуванням вимог до якості наданих інформаційних послуг шляхом розроблення методу прогнозування експлуатаційних характеристик та оцінювання якісних показників на підґрунті нової математичної моделі процесу передавання потоків даних.

Основні завдання дослідження відповідно до поставленої мети полягають у нижченаведеному:

- проаналізувати особливості функціонування, умов експлуатації та експлуатаційні характеристики наявних безпроводових мереж IEEE 802.11;
- обґрунтувати необхідність удосконалення математичної моделі та методики розрахунку експлуатаційних характеристик безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11;
- розробити удосконалену математичну модель процесу передавання даних в мережах IEEE 802.11 з конкурентним доступом і метод прогнозування експлуатаційних характеристик та оцінювання якісних показників з її застосуванням;
- дослідити теоретичну межу рівня експлуатаційних характеристик, з урахуванням основних чинників впливу;
- розробити метод оцінювання ефективності використання ресурсів мережі та експериментально перевірити правильність методики оцінювання експлуатаційних параметрів безпроводових мереж IEEE 802.11 з конкурентним доступом.

*Об'єкт дослідження* – процес передавання даних засобами безпроводових мереж IEEE 802.11.

*Предмет дослідження* – методика оцінювання експлуатаційних характеристик безпроводових мереж IEEE 802.11.

**Методи дослідження.** Метод узагальнення для з'ясування характеристик мультимедійного трафіка, метод порівняльного аналізу для виявлення особливостей безпроводових технологій доступу до середовища передавання в мережах IEEE 802.11, критичний аналіз для дослідження теоретичних підходів до аналізу процесів у безпроводових інформаційних мережах, теоретичний

аналіз процесу передавання інформації в безпроводовій мережі із застосуванням теорії ймовірностей, метод імітаційного моделювання для отримання кількісної оцінки впливу характеристик фізичного каналу на характеристики безпроводової мережі, натурний експеримент для перевірки відповідності розрахункових та реальних характеристик мережі.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Удосконалено математичну модель процесу передавання інформаційних потоків у безпроводовій мережі IEEE 802.11 з конкурентним доступом у режимі насиченого навантаження на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна, що на відміну від математичної моделі, побудованої на підґрунті концепції часового слоту, дозволяє розрахувати експлуатаційні характеристики мережі без обмеження кількості активних станцій і обсягів корисного навантаження в кадрах даних.

2. Набув подальшого розвитку метод оцінювання граничних значень експлуатаційних характеристик безпроводових мереж IEEE 802.11, що ґрунтується на застосуванні удосконаленої математичної моделі процесу передавання інформаційних потоків у безпроводовій мережі IEEE 802.11 з конкурентним доступом, для якого на відміну від методів, що ґрунтуються на концепції часового слоту, відсутні обмеження щодо величини ймовірності колізій та кількості активних станцій мережі, що надає можливість проектувати безпроводові мережі із заданими значеннями якісних показників.

3. Вперше запропоновано метод оцінювання ефективності використання ресурсів безпроводових мереж IEEE 802.11 з конкурентним доступом із застосуванням коефіцієнта корисного навантаження, що дозволяє інтегрально оцінити можливості мережі щодо передавання потокової інформації і надає можливість оцінити ефективність нових технічних рішень, запропонованих для удосконалення стандарту 802.11.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Методика прогнозування експлуатаційних параметрів безпроводової мережі 802.11 залежно від кількості абонентів і структури інформаційного трафіка дозволяє здійснювати проектування безпроводових мереж з урахуванням прогнозованої кількості абонентів, структури трафіка та очікуваних показників якості обслуговування.

2. Методика прогнозування експлуатаційних параметрів безпроводової мережі IEEE 802.11 дозволяє здійснити модернізацію вже наявних безпроводових мереж без необґрунтованої надмірності апаратних засобів.

3. Теоретичні обґрунтування розрахункових співвідношень і самі розрахункові співвідношення можуть бути використані в навчальному процесі підготовки кваліфікованих фахівців у сфері телекомунікацій та комп'ютерних мереж.

4. Отримані в дисертації уточнені оцінки інформаційних можливостей безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11 дозволяють удосконалити алгоритм адаптації мережі до умов функціонування з урахуванням кількості станцій, типу трафіка та електромагнітної обстановки.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес на

кафедрі звукотехніки та реєстрації інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в навчальний курс: «Технології безпроводових локальних мереж».

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Роботи [5, 6, 7, 8, 10] автор зробив самостійно. У роботах, зроблених у співавторстві, автору належать такі результати: у праці [1] – обґрунтовані розрахункові співвідношення для дослідження ймовірності виникнення колізій в каналі передавання; [11] – уточнено розрахункові співвідношення та здійснено розрахунки пропускну здатності безпроводового каналу; [2, 12, 13] – дослідження характеристик аудіовізуального потоку та аналіз ефективності використання безпроводового каналу; [3] – розроблення програми натурального експерименту, участь в експерименті та обробленні результатів; [9] – моделювання процесів у безпроводовій мережі та обґрунтування результатів, формування структури доповіді; [4] – узагальнення результатів дисертаційних досліджень, інтерпретація отриманих результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи оприлюднено та обговорено на 6 міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях: VIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених «ЕЛЕКТРОНІКА-2015» (Київ, 2015), X, XI, XII Міжнародні науково-технічні конференції молодих учених «ЕЛЕКТРОНІКА-2017», «ЕЛЕКТРОНІКА-2018», «ЕЛЕКТРОНІКА-2019» (Київ, 2017, 2018, 2019), 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) (Lviv-Slavske, 2018), Міжвузівська науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ», (Київ, 2015 р), Науково-технічна конференція студентів та аспірантів «Сучасні проблеми застосування електронних та інформаційних технологій в телекомунікаціях, телебаченні та цифровому кінематографі» (Київ, 2017 р.).

**Публікації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи оприлюднено в 13 наукових працях, а саме: 5 статей у наукових фахових виданнях України [1, 6, 7, 10, 11], які занесено до міжнародних наукометричних баз), 3 статті у науково-технічних виданнях України з міжнародною сферою розповсюдження [4, 12, 13], 5 доповідей та тез доповідей у збірках матеріалів конференцій [2, 3, 5, 8, 9] (одну доповідь індексовано у наукометричній базі Scopus [8]).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із переліку умовних позначень та скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 166 сторінок. Робота містить 43 рисунки, 18 таблиць та список джерел посилання з 68 найменувань. Основний текст викладено на 138 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано мету дослідження та науково-технічні завдання, необхідні для її досягнення, показано зв'язок дослідження з науковими програмами та темами, наведено наукову новизну отриманих результатів, їх практичну цінність та особистий внесок здобувача, надано інформацію про апробацію результатів роботи.

У **першому розділі** проаналізовано основні принципи функціонування безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11 та досліджено особливості наявних методик прогнозування експлуатаційних характеристик таких мереж, розглянуто особливості функціонування мереж за умов їх значного поширення, узагальнено відомі результати випробувань пропускної здатності безпроводових мереж.

Стандарт IEEE 802.11 призначено забезпечити функціонування безпроводової мережі на двох нижніх рівнях моделі ISO/OSI (базової еталонної моделі взаємодії відкритих систем), фізичному і каналному рівнях.

На фізичному рівні існує кілька варіантів специфікацій стандарту 802.11 (основні наведено на рис. 1), які відрізняються використанням частотним діапазоном, методами модуляції та кодування.

Канальний рівень	LLC					
	MAC	PCF				
		DCF				
Фізичний рівень	802.11b 2,4 ГГц DSSS з CCK до 11 Мбіт/с	802.11a 5 ГГц 64-QAM до 54 Мбіт/с	802.11g 2,4 ГГц 64-QAM до 54 Мбіт/с	802.11n 2,4 та 5 ГГц 64-QAM до 600 Мбіт/с	802.11ac 5 ГГц 256-QAM до 6933 Мбіт/с	802.11ax 2,4 та 5 ГГц 1024-QAM до 9608 Мбіт/с

Рисунок 1 – Структура та визначальні характеристики фізичного та каналного рівнів мереж IEEE 802.11 відповідно до моделі ISO/OSI

Виділяють два різновиди функції

координації. Розподілена функція координації (DCF – Distributed Coordination Function) є обов'язковою і основною для всіх специфікацій стандарту IEEE 802.11. Ця функція координації забезпечує рівноправний конкурентний доступ до середовища передавання інформаційних кадрів для всіх вузлів безпроводової мережі (в тому числі і для точки доступу).

Додаткову функцію координації – функцію централізованої координації доступом (PCF – Point Coordination Function), призначено для організації централізованого неконкурентного доступу до каналу, в якому реалізовано механізм «опитування – відповідь».

Режим конкурентного доступу (DCF) є обов'язковим для всіх специфікацій стандарту і більша частина безпроводових мереж функціонує саме з використанням цього режиму.

Розподіл часових інтервалів під час спроби доступу до безпроводового каналу в режимі DCF наведено на рис. 2.

На рис.2 застосовано стандартні позначення: DIFS – міжкадровий інтервал режиму DCF, SIFS та AIFS – короткий та арбітражний міжкадрові інтервали, PIFS – міжкадровий інтервал централізованого керування,  $CW=W$  – максимальне початкове значення конкурентного вікна.

Для формування інтервалу відстрочки станція має спеціальний лічильник відстрочки (random backoff counter). Часові інтервали відстрочки передавання вимірюють в одиницях елементарного часового інтервалу – часового слоту ( $\sigma$ ).

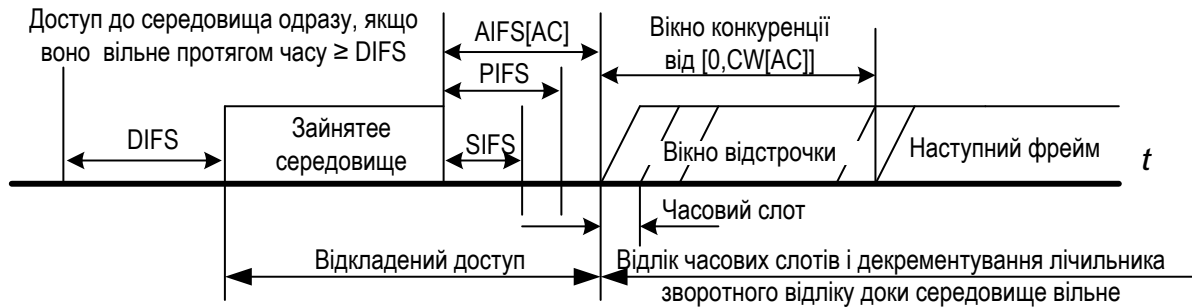


Рисунок 2 – Розподіл часових інтервалів в режимі DCF

Щоб зменшити проблему прихованої станції та втрати часу через колізії, у стандарті 802.11 передбачено механізм «Запит щодо відправлення/Готовність до відправлення» (Request-to-Send/Clear-to-Send – RTS/CTS).

У початкових технологіях стандарту IEEE 802.11 (специфікації IEEE 802.11 та IEEE 802.11b) запропоновано використовувати кодове розділення каналів, що забезпечувало максимальну швидкість сигнального потоку 2 Мбіт/с та 11 Мбіт/с. У подальшому відбувся перехід до застосування технології OFDM, що забезпечило значне збільшення швидкості передавання інформаційних потоків.

Можна відзначити таку спадковість специфікацій: першою специфікацією, в якій було застосовано метод OFDM для діапазону 5 ГГц була специфікація 802.11a, наступною – специфікація 802.11g, в якій відтворено специфікацію 802.11a для діапазону 2,4 ГГц майже без змін, наступною – специфікація 802.11n (діапазони 2,4 ГГц та 5 ГГц), в якій додатково передбачено можливість розширення частотної смуги каналу вдвічі (до 40 МГц) і застосовувати режим багатоканального передавання (MIMO), наступною – специфікація 802.11ac (діапазони 5 ГГц), в якій зроблено додаткові удосконалення технології доступу до каналу і його використання для передавання інформаційних потоків. Останньою в цьому ряду є специфікація 802.11ax (розширений діапазон частот від 1 ГГц до 7 ГГц), в якій поліпшення технологічних характеристик попередніх специфікацій передбачено за рахунок значної зміни параметрів OFDM потоків та застосування повнодуплексного режиму передавання на відміну від напівдуплексного попередніх специфікацій

У дисертаційній роботі проаналізовано результати вимірювання пропускну здатності радіоканалу безпроводових мереж, що функціонують за специфікаціями 802.11n та 802.11ac, у разі застосування протоколів транспортного рівня UDP та TCP, отриманих іншими дослідниками.

З виходом нових стандартів Wi-Fi, а також у зв'язку із загальним



поширенням гаджетів, які активно використовують Wi-Fi з'єднання, користувачі все частіше звертають увагу на те, що якість Wi-Fi мереж погіршується, навіть за умови появи нових удосконалених специфікацій.

Наведено результати досліджень, згідно з якими причинами деградації експлуатаційних параметрів Wi-Fi мереж є збільшення кількості пристроїв, з'єднаних з однією точкою доступу, та висока щільність безпроводових мереж у житлових, офісних та інших багатоповерхових спорудах.

Подальші дослідження спрямовано на аналіз та удосконалення методики оцінювання експлуатаційних характеристик безпроводової мережі та їх залежність від системних та експлуатаційних параметрів з метою поліпшити ефективність передавання аудіовізуальної інформації засобами мереж 802.11.

У третьому підрозділі здійснено обґрунтування необхідності удосконалити методику розрахунку характеристик безпроводових мереж IEEE 802.11.

Детально досліджено три методики оцінювання пропускної здатності безпроводового каналу. Дві методики ґрунтуються на концепції часового слоту і одна методика – на концепції віртуального конкурентного вікна.

З'ясовано, що найбільш поширена методика, що ґрунтується на концепції часового слота (запропонована Дж. Б'янкі), ґрунтується на математичній моделі, що не враховує всіх основних функціональних залежностей між системними параметрами безпроводової мережі та стохастичними експлуатаційними характеристиками. Зазначену методику можна застосувати для визначення максимальної пропускної здатності  $S$ , у разі наявності однієї активної станції мережі. Для цього треба скористатись співвідношенням:

$$S = \frac{E[PL]}{E[T_{Fr\_Tx}] + DIFS + ST \cdot CW_{min} / 2}, \quad (1)$$

де  $E[PL]$  – усереднене значення навантаження, передане в одному кадрі,  $E[T_{Fr\_Tx}]$  – усереднене значення часу передавання одного кадру даних,  $ST$  – тривалість часового слоту,  $CW_{min}/2$  – усереднене значення лічильника відстрочки,  $ST \cdot CW_{min}/2$  – це усереднений час, витрачений на відстрочку між інтервалами передавання двох послідовних кадрів даних.

Методику не можна застосувати для визначення пропускної здатності мережі, в якій одночасно функціонує кілька або багато активних станцій з насиченим навантаженням, через відсутність співвідношення для визначення ймовірності колізій  $p_c$  в такій мережі. Крім того, в розглянутій методиці відсутні співвідношення, що дозволяють визначити середню затримку передавання та нерівномірність середньої затримки. Це – два показника якості, що багато в чому визначають здатність мережі передавати потокову інформацію і зокрема аудіовізуальний контент.

В математичній моделі, на якій ґрунтується зазначена методика, вираз для визначення ймовірності успішного передавання кадру даних конкретною станцією  $P_{sc}$  за умови, що число повторів не перевищує число  $R$ , має вигляд:

$$P_{sc} = \frac{2(1-2p_c)(1-p_c^{R+1})}{(1-2p_c)(1-p_c^{R+1}) + W(1-p_c)[1-(2p_c)^{R+1}]} \quad (2)$$

Згідно зі співвідношенням (2), за умови  $p_c = 0,5$  ймовірність успішного передавання  $P_{sc}$  дорівнює нулю, що суперечить фізичній сутності процесу передавання даних безпроводовою мережею.

Друга досліджена методика, що ґрунтується на концепції часового слота, запропонована для оцінювання пропускної здатності мережі стандарту IEEE 802.11ac. За результатами детального аналізу з'ясовано, що в цій методиці враховано технологічні особливості, реалізовані в мережі IEEE 802.11ac, але базова математична модель залишилась такою ж, що й у першій дослідженій методиці.

Обґрунтовано, що обидві досліджені методики визначення пропускної здатності й інших експлуатаційних характеристик не можна застосувати для проектування мереж із заданими характеристиками якості обслуговування.

Третьою дослідженою методикою є методика, що ґрунтується на концепції віртуального конкурентного вікна. Основна ідея концепції полягає в тому, що у насиченому режимі, коли кожна станція весь час намагається отримати доступ до каналу для передавання кадру даних, процес функціонування безпроводового каналу можна розглядати як квазістаціонарний випадковий процес.

Віртуальне конкурентне вікно (VCW) – це стохастичний параметр безпроводової мережі за стандартом Wi-Fi, який чисельно дорівнює усередненому числу елементарних часових інтервалів (часових слотів), протягом яких лічильник зворотного відліку здійснює відлік інтервалу відстрочки після завершення передавання попереднього кадру до початку передавання наступного кадру даних

Концепція дозволяє отримати функціональні залежності як для однієї окремої станції, так і для сегменту безпроводової мережі в цілому.

Розроблено математичну модель процесу передавання потоків даних, що є альтернативою моделі, створеній на підґрунті часового слоту. Проте, в цій моделі не враховано зміну кількості станцій, що конкурують за канал, внаслідок реалізації алгоритму збільшення конкурентного вікна для станцій, що потрапили в колізію. Також потребують уточнення співвідношення для визначення витрат часу на вільні від передавання часові слоти, для визначення середньої затримки передавання та нерівномірності цієї затримки. Тобто наявну математичну модель не можна використати для адекватного прогнозування експлуатаційних характеристик мережі.

Зроблено висновок про те, що оскільки концепція віртуального конкурентного вікна дозволяє установити безпосередні функціональні зв'язки між системними параметрами та експлуатаційними характеристиками, удосконалену математичну для вирішення узагальненого завдання дисертаційної роботи можна розробити та обґрунтувати саме на підґрунті цієї концепції.

У **другому розділі** наведено детальне обґрунтування **удосконаленої математичної моделі** на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна. Розроблена математична модель містить співвідношення для визначення пропускної здатності мережі IEEE 802.11 в режимі конкурентного доступу,

часу затримки передавання кадру, нерівномірності затримки. Сформовано співвідношення для визначення таких стохастичних характеристик процесу функціонування мережі з кількома активними станціями в насиченому режимі: ймовірності колізії, ймовірності успішного передавання кадру даних, ймовірності втрати пакету, кількості колізій за час реалізації конкурентного вікна.

Базовою технологією доступу до радіоканалу в мережах всіх специфікацій стандарту IEEE 802.11 є технологія конкурентного доступу, яку реалізовано із застосуванням розподіленої функції координації (DCF) безпосередньо або з використанням алгоритму RTS/CTS. Удосконалену модель сформовано для обох режимів.

Досліджено процес виникнення колізій і запропоновано розрахункові співвідношення для квазістаціонарного режиму. Розрахунок зроблено із застосуванням рекурентних співвідношень, що характеризують процес установаження квазістаціонарного режиму. Обґрунтовано, що через виникнення колізій число станцій, які конкурують за доступ до радіоканалу, менше загального числа активних станцій в мережі, рис. 3-4.

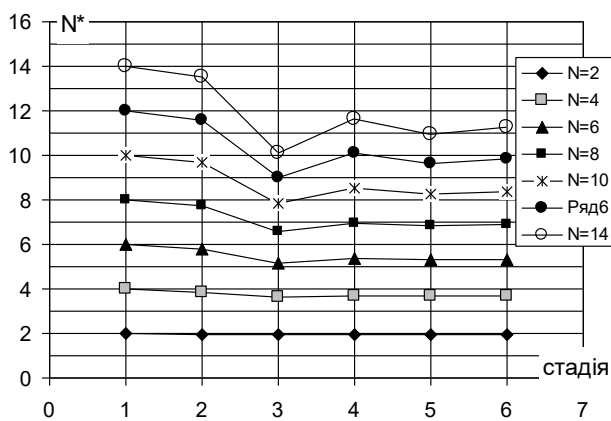


Рисунок 3 – Зміна кількості станцій, що конкурують за канал, е процесі встановлення квазістаціонарного режиму

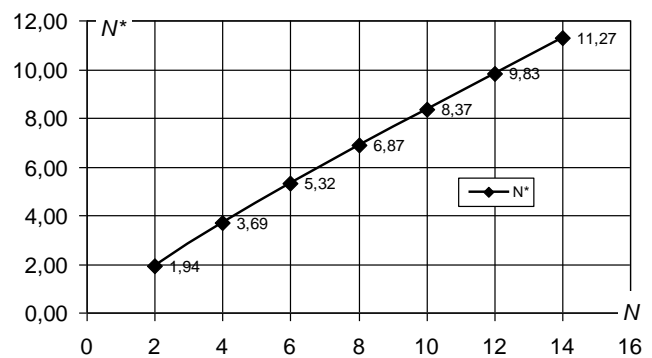


Рисунок 4 – Залежність кількості конкуруючих станцій  $N^*$  від загальної кількості активних станцій в безпроводовій мережі  $N$ ,  $CW_{\min}=15$

Початкове значення ймовірності колізій для кожної станції безпроводової мережі з конкурентним доступом з  $N$  активними станціями становить:

$$p_c = 1 - (1 - p_{c1})^{N-1}, \quad (3)$$

де  $p_{c1}$  – ймовірність колізії на першій стадії доступу до каналу.

У квазістаціонарному режимі ймовірність колізії набуває постійного значення, яке залежить від кількості станцій, що безпосередньо беруть участь у конкуренції за канал, рис.3.

Ймовірність успішного передавання, рис.5, певного кадру даних як повна ймовірність передавання його протягом  $R$  спроб становитиме:

$$P_S = (1 - p_c) + p_c(1 - p_c) + p_c^2(1 - p_c) + p_c^{i-1}(1 - p_c) + \dots + p_c^{R-1}(1 - p_c) = \quad (4)$$

$$= (1 - p_c)[1 + p_c + p_c^2 + \dots + p_c^{i-1} + \dots + p_c^{R-1}] = 1 - p_c^R$$

Загальну ймовірність колізії в мережі  $P_c$ , рис. 6, знайдено із застосуванням співвідношень комбінаторики як відношення різниці кількості розміщень з повторами та без повторів до кількості розміщень із  $W$  по  $N$  з повторами. Розрахункове співвідношення має вигляд:

$$P_c = \frac{\tilde{A}_W^N - A_W^N}{\tilde{A}_W^N} = 1 - \frac{W!}{(W-N)!W^N}, \quad (5)$$

де  $\tilde{A}_W^N = W^N$  – кількості розміщень із  $W$  по  $N$  з повторами;

$A_W^N = \frac{W!}{(W-N)!}$  – кількості розміщень із  $W$  по  $N$  без повторів.

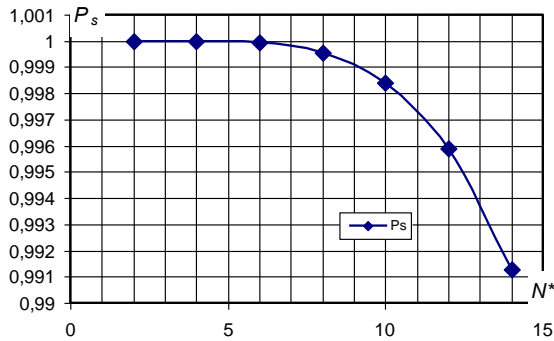


Рисунок 5 – Залежність ймовірності успішного передавання кадру від кількості станцій з насиченим навантаженням,  $CSW_{\min} = 15$

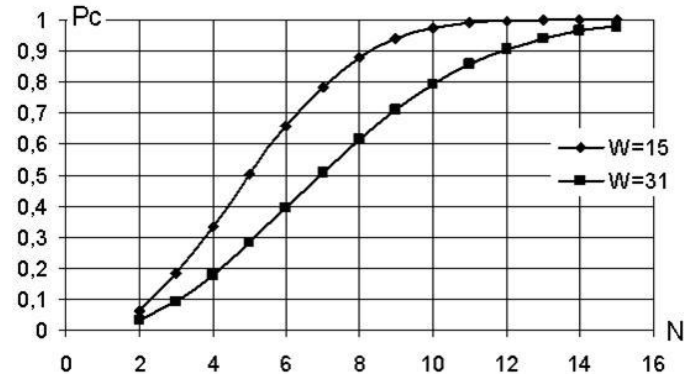


Рисунок 6 – Графік залежності ймовірності колізії  $P_c$  в безпроводовій мережі з  $N$  активними станціями

З урахуванням того, що кількість спроб передати кадр даних у разі виникнення колізій становить  $R$ , значення віртуального конкурентного вікна можна визначити як:

$$\begin{aligned} V_{CW} &= \frac{CW_1}{2}(1-p_c) + \frac{2CW_1}{2}(1-p_c)p_c + \frac{4CW_1}{2}(1-p_c)p_c^2 + \dots + \frac{2^R CW_1}{2}(1-p_c)p_c^R = \\ &= \frac{CW_1 \cdot (1-p_c)}{2} \cdot \sum_{i=1}^{R+1} (2p_c)^{i-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Протягом реалізації конкурентного вікна буде мати місце  $N_c$  колізій, що відбуваються на першій, другій і всіх інших можливих  $R$  стадіях доступу до каналу. Числове значення кількості колізій є математичним сподіванням числа колізій за час реалізації віртуального конкурентного вікна.

$$N_c = \frac{N}{2} p_c + \frac{N}{2} p_c^2 + \frac{N}{2} p_c^3 + \dots + \frac{N}{2} p_c^R = p_c \cdot \frac{N}{2} \cdot \frac{1-p_c^{R+1}}{1-p_c}. \quad (7)$$

Час реалізації віртуального конкурентного вікна можна визначити за співвідношенням:

$$T_{VCW} = N \cdot \bar{T}_{PL} + N_c \cdot \bar{T}_c + n_{id} \cdot \sigma; \quad (8)$$

де  $N$  – кількість активних станцій у мережі;

$\bar{T}_{PL}$  – тривалість усередненого часового інтервалу, протягом якого відбувається безпосереднє передавання кадру даних, з урахуванням усіх допоміжних сигналів і інтервалів;

$\bar{T}_c$  – тривалість усередненого часового інтервалу колізії.

Значення нерівномірності затримки – джитера – знайдено за загальною формулою:

$$\sigma^{(\tau)} = \tau^{(max)} - \tau^{(min)} = 2\sqrt{D(\tau)}. \quad (9)$$

На підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна, для визначення дисперсії отримано співвідношення:

$$D(\tau) = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_{j=1}^{m+1} N_j \cdot (\tau_j^* - \bar{\tau})^2, \quad (10)$$

де  $N_j$  та  $\tau_j^*$  – відповідно, кількість кадрів даних та максимальна затримка передавання кадру даних через канал під час  $j$ -ої спроби,  $j \in \{1, 2, \dots, R\}$ .

Пропускнуну здатність безпроводового каналу з  $N$  активними станціями з насиченим навантаженням з урахуванням колізій, але без урахування завад та ослаблення сигналу через наявність перешкод, згідно з концепцією віртуального конкурентного вікна треба визначати за співвідношенням:

$$S = \frac{N \cdot E[PL_1] \cdot P_s}{T_{VCW}}. \quad (11)$$

Для врахування впливу завад у всіх отриманих вище співвідношеннях, замість ймовірності колізій, обґрунтовано й запропоновано використовувати ймовірність спотворення кадру

$$p_{ef} = p_c + PER - p_c \cdot PER. \quad (12)$$

Значення коефіцієнта помилкових пакетів  $PER$  можна визначити або безпосереднім вимірюванням в зоні розгортання безпроводової мережі, або на етапі проектування мережі шляхом моделювання процесів у безпроводовому каналі із застосуванням спеціалізованих програмних засобів (наприклад, ADS).

Для каналу, що функціонує в режимі  $RTS/CTS$ , час реалізації віртуального конкурентного вікна слід обчислювати за співвідношенням:

$$T_{VCW} = N \cdot T_{PL} + N \cdot PER \cdot (T_{PL} + T_{RTS}) + n_c T_c + \sigma \cdot VCW, \quad (13)$$

де  $T_{RTS}$  – витрати часу на передавання кадру  $RTS$ .

Ймовірність втрати пакету, без урахування можливості його анулювання через перевершення часу життя, можна визначити безпосередньо із застосуванням ймовірності успішного передавання, а саме:

$$P^{(rs)} = 1 - P_s. \quad (14)$$

**У третьому розділі запропоновано метод оцінювання експлуатаційних характеристик**, що ґрунтується на застосуванні удосконаленої математичної моделі. Досліджено граничні значення експлуатаційних характеристик безпроводових мереж специфікацій IEEE 802.11a/n.

Результати розрахунків максимальної пропускної здатності для блоків корисного навантаження різної величини (від  $PL = 64$  до  $PL = 1500$  байтів) наведено на рис. 7. У разі використання протоколу TCP для передавання кадрів даних з корисним навантаженням від 64 до 1500 байтів, пропускна здатність мережі змінюється від 1,52 Мбіт/с до 14,78 Мбіт/с, а в разі використання

протоколу UDP – від 2,59 Мбіт/с до 17,8 Мбіт/с.

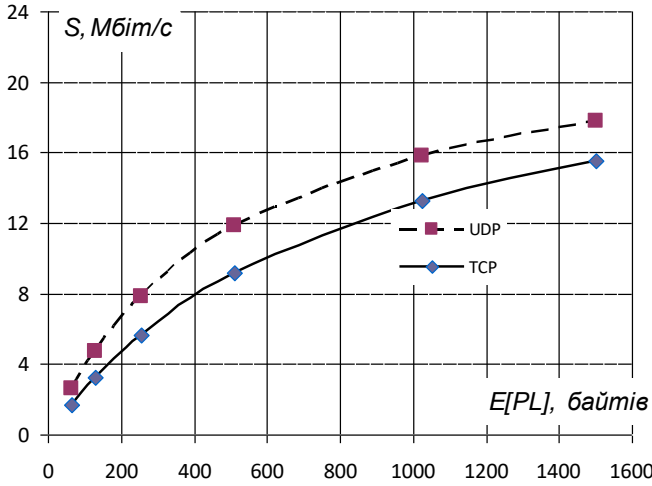


Рисунок 7 – Графік залежності максимальної пропускної здатності від розміру блоку даних корисного навантаження для мережі IEEE802.11a

У разі використання транспортного протоколу UDP, розрахункова пропускна здатність каналу за наявності тільки однієї станції з насиченим навантаженням буде на 70% більше, ніж у разі використання TCP для малих кадрів (корисне навантаження 64 байти) і

на 20% – для великих (корисне навантаження 1500 байт).

Розраховані значення пропускної здатності для мережі 802.11a з урахуванням кількості станцій (системна швидкість 24 Мбіт/с) для протоколів TCP і UDP наведено на рис. 8 рис. 9. Графіки отримано для режиму безпосередньої конкуренції за канал (без кадрів керування RTS та CTS).

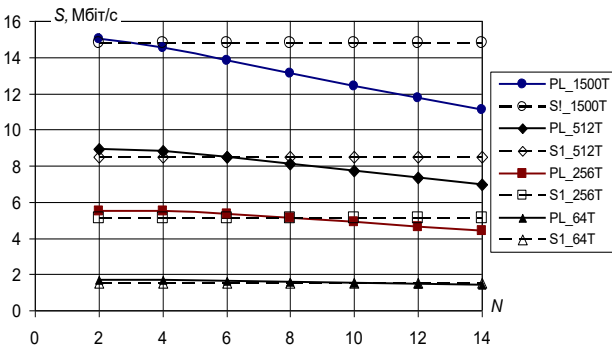


Рисунок 8 – Графіки залежності пропускної здатності  $S$  каналу безпроводової мережі від кількості активних станцій  $N$  у разі використання протоколу TCP

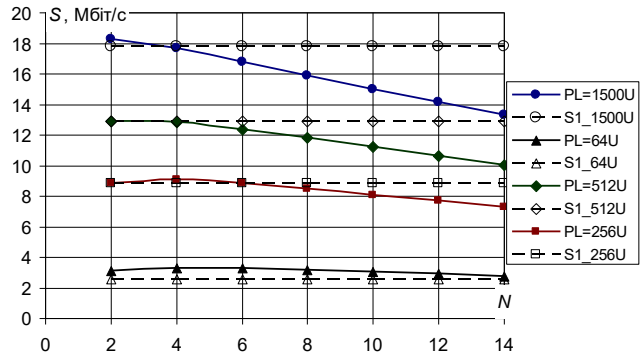


Рисунок 9 – Графіки залежності пропускної здатності каналу безпроводової мережі від кількості активних станцій  $N$  у разі використання протоколу UDP

У разі використання протоколу UDP, пропускна здатність, що припадає на одну станцію в мережі з двома активними станціями, становить 1,552 Мбіт/с

(64 байти корисного навантаження в кадрі) та 9,135 Мбіт/с (1500 байтів). У мережі з чотирнадцятьма активними станціями частка пропускної здатності становить 0,198 Мбіт/с (64 байти) та 0,952 Мбіт/с (1500 байтів), рис.10.

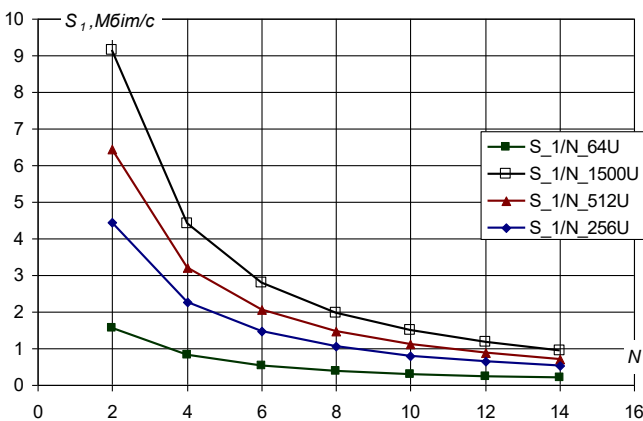


Рисунок 10 – Графіки залежності частки пропускної здатності  $S_1$ , що припадає на одну станцію мережі, в разі використання протоколу UDP

Розрахункову максимальну пропускну здатність безпроводового каналу, в разі врахування впливу колізій, наведено на рис. 11. Пунктирними лініями наведено пропускну здатність каналу за ідеальних умов для однієї станції в мережі.

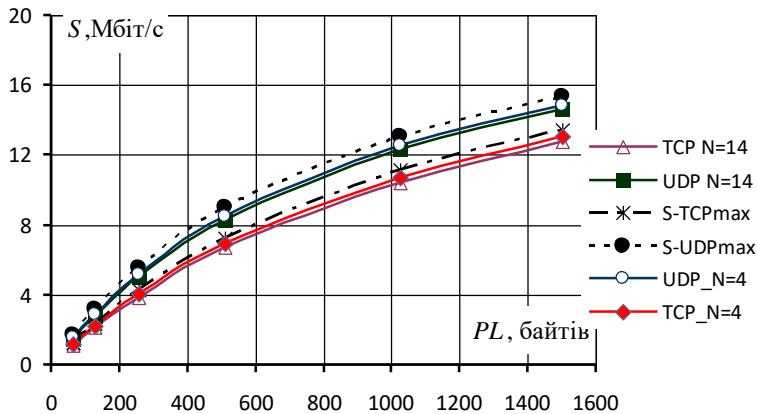


Рисунок 11 – Залежність максимальної пропускну здатності безпроводової мережі стандарту 802.11a в режимі RTS/CTS, з урахуванням колізій

У порівнянні з пропускну здатністю каналу за ідеальних умов для протоколу UDP, пропускну

здатність зменшується на 4,8% (навантаження кадру 1500 байт) та 11,4% (навантаження кадру 64 байти), й на 3% (1500) та 6,5% (64), для протоколу TCP. Тобто, в разі застосування режиму RTS/CTS, пропускну здатність змінюється незначною мірою, за умови зміни кількості активних станцій в широкому діапазоні.

На рис. 12 та рис. 13 наведено графіки залежності усередненого часу та нерівномірності затримки передавання кадру даних через канал залежно від кількості станцій в мережах IEEE 802.11a за системної швидкості 24 Мбіт/с.

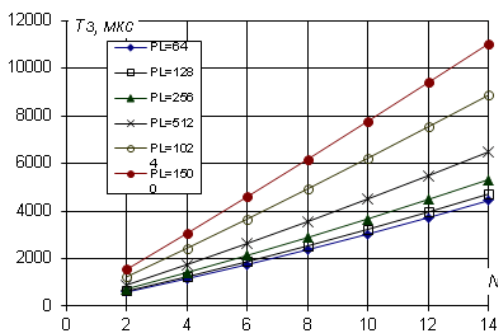


Рисунок 12 – Залежність усередненого часу затримки від кількості активних станцій з насиченим навантаженням в режимі RTS/CTS за системної швидкості 24 Мбіт/с (UDP)

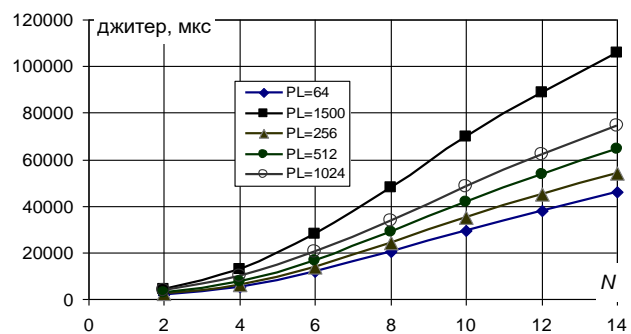


Рисунок 13 – Залежність нерівномірності затримки від кількості активних станцій в насиченій мережі для PL = 64 байти та PL = 1500 байтів в режимі RTS/CTS, транспортний протокол UDP

Ймовірність втрати пакета під час передавання у безпроводовій мережі IEEE802.11a з обмеженою кількістю повторних спроб (R=6), визначену за співвідношенням (14), наведено на рис.14.

На рис. 15 наведено графіки залежності пропускну здатності безпроводової мережі IEEE 802.11n у змішаному режимі від кількості активних станцій в мережі, з урахуванням колізій для режиму RTS/CTS.

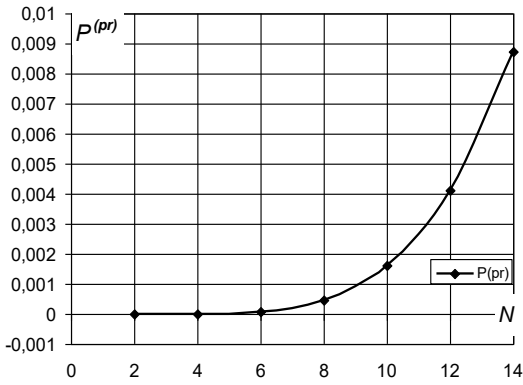


Рисунок 14 – Графік залежності ймовірності втрати кадру даних в насиченій мережі

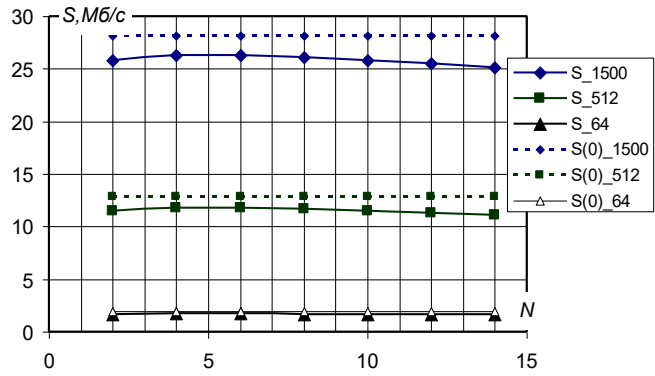


Рисунок 15 – Залежність пропускної здатності S мережі IEEE 802.11n від кількості активних станцій N

Для оцінювання меж зміни нерівномірності затримки на рис.16 наведено результати розрахунків для значень корисного навантаження 64 байти та 128, 256, 1500 байтів в кадрах даних.

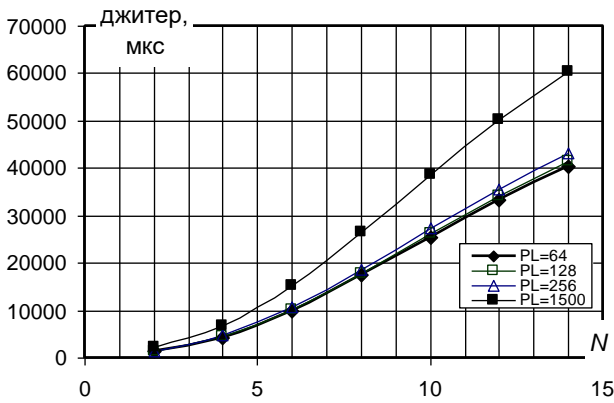


Рисунок 16 – Залежність нерівномірності затримки передавання кадрів (джитера) від кількості активних станцій N в мережі IEEE 802.11n

Як і у випадку мереж за специфікацією IEEE 802.11a, нерівномірність затримки зростає нелінійно, в разі збільшення кількості активних станцій від двох до восьми.

Подальше збільшення кількості активних станцій (від восьми до чотирнадцяти) призводить до лінійного збільшення нерівномірності затримки.

У четвертому розділі наведено результати натурного експерименту для перевірки методики оцінювання експлуатаційних характеристик мережі і запропоновано метод оцінювання ефективності використання ресурсів безпроводової мережі із застосуванням коефіцієнта корисного навантаження.

Характеристики потоків даних, сформованих найбільш поширеними звуковими кодеками, наведено в табл.1.

Інтенсивність та періодичність передавання кадрів аудіовізуального потоку для кодеків H.264 наведено в табл. 2.

Таблиця 1 – Характеристики потоків даних, сформованих звуковими кодеками

Характеристики звукового кодека				Розрахунок інтенсивності інформаційного потоку			
Кодек та бітова швидкість (кбіт/с)	Розмір вибірки кодека (байтів)	Інтервал вибірки кодека (мс)	Усереднена суб'єктивна оцінка (MOS*)	Розмір голосових даних (байтів)	Тривалість голосових даних (мс)	Кількість пакетів за секунду (PPS)	Пропускна здатність Ethernet (кбіт/с)
G 711 (64 кбіт/с)	80	10	4.1	160	20	50	87.2
G 729 (8 кбіт/с)	10	10	3.92	20	20	50	31.2



За результатами порівняння даних, наведених в табл. 1, та характеристик мережі 802.11a така мережа забезпечує надійне передавання голосового трафіка одночасно для великої кількості користувачів (не менше 14 активних абонентів на одну точку доступу) як у разі застосування системної швидкості 54 Мбіт/с, так і у разі застосування системної швидкості 24 Мбіт/с. Те саме стосується мережі 802.11n, що функціонує в традиційному або змішаному режимі з одним просторовим каналом в частотній смузі 20 МГц в режимі із системною швидкістю 72 Мбіт/с.

Таблиця 2 – Характеристики пакетизованого аудіовізуального потоку

Роздільна здатність, елементів зображення	1920x1080	1280x720	640x480	320x240
Інтенсивність аудіовізуального потоку, кбіт/с	8000	6000	2000	500
Інтенсивність передавання кадрів, кадр/с	714	536	179	45
Період надходження кадрів, мс	1,4	1,86	5,59	22,2

Для компенсації нерівномірності затримки, що виникає під час передавання пакетів у розглянутих вище безпроводових мережах IEEE 802.11a з системною швидкістю 54 Мбіт/с, можна використовувати невеликі за обсягом буфери пам'яті, оскільки навіть за наявності чотирнадцяти активних абонентів у мережі нерівномірність лише трохи перевищує період надходження пакетів. Проте, у разі великої кількості абонентів і невеликого буфера в приймачі, можливе незначне погіршення якості голосового зв'язку, через накопичення затримки або значну затримку окремих пакетів.

У безпроводовій мережі IEEE 802.11n, що функціонує у змішаному режимі, нерівномірність затримки пакетів має значно більшу величину порівняно з мережами IEEE 802.11a. Так, у разі системної швидкості 72 Мбіт/с за наявності десяти активних абонентів нерівномірність затримки перевищує період надходження голосових пакетів. Незначне погіршення якості голосового зв'язку через накопичення затримки або значну затримку окремих пакетів можна очікувати в такій мережі, уже за наявності десяти активних абонентів.

У разі застосування в безпроводовій мережі IEEE 802.11a системної швидкості 54 Мбіт/с, мережа може забезпечити якісне передавання та відтворення до трьох відеопотоків стандартної чіткості, стиснених за стандартом MPEG 2 або MPEG 4, через обмеження пропускної здатності, що припадає на одну активну станцію мережі. Мережа може забезпечити передавання до шести відеопотоків пониженої чіткості, кодованих за стандартом H.264.

Мережа IEEE 802.11n у змішаному режимі з використанням одного просторового каналу, системної швидкості 72 Мбіт/с і частотної смуги 20 МГц може забезпечити таку ж ефективність передавання аудіовізуального контенту в реальному часі, що й мережа IEEE 802.11a з системною швидкістю 54 Мбіт/с.

Натурні випробування для перевірки адекватності удосконаленої моделі процесу передавання інформаційних потоків здійснено в навчальному корпусі факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського на обладнанні безпроводової мережі кафедри звукотехніки та реєстрації інформації.

Порівняння отриманих під час випробувань значень пропускної здатності

з прогнозованими значеннями свідчить про їх хорошу відповідність. Так, розрахункове значення пропускної здатності каналу, в разі функціонування двох станцій в насиченому режимі, становить 55,158 Мбіт/с, а експериментально визначене 54,442 – 54,856 Мбіт/с. Розбіжність значень знаходиться в межах 1,3%. Це, в свою чергу, свідчить про те, що у запропонованій математичній моделі й методі визначення граничних параметрів безпроводової мережі з конкурентним режимом доступу адекватно враховано процеси в реальній мережі, що обумовлює хороше співпадіння розрахункових та експериментальних значень.

Результати розрахунків пропускної здатності  $S_1$  безпроводового каналу мережі 802.11n за наявності завад наведено на рис.17. Для побудови наведених графіків використано результати комп'ютерного моделювання процесу виникнення помилкових пакетів за наявності завад. Коефіцієнт помилкових пакетів – PER. Пунктиром на графіку наведено пропускну здатність мережі без впливу завад. Наявність завад призводить до обмеження можливих схем модулювання та каналного кодування сигналів MCS. У разі, коли  $E_b/N_0 < 14$  дБ, передавання сигналу в режимі з MCS 7 (системна швидкість 72 Мбіт/с) взагалі стає неможливим, але можлива надійна робота в режимі з MCS 3 (системна швидкість 33 Мбіт/с).

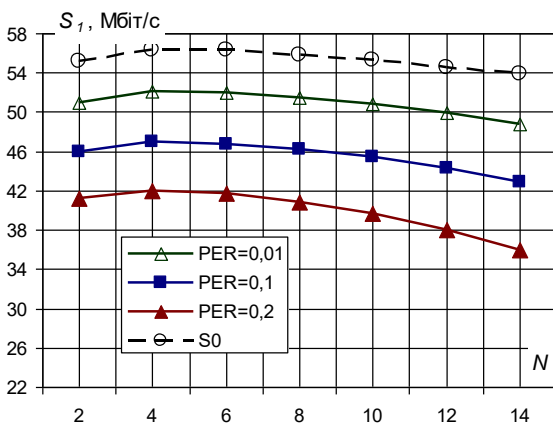


Рисунок 17 – Графіки залежності пропускної здатності безпроводового каналу IEEE802.11n

З появою помилкових кадрів через вплив завад відбувається швидка деградація пропускної здатності безпроводової мережі.

Для характеристики ефективності використання ресурсів безпроводової мережі запропоновано метод оцінювання із застосуванням коефіцієнту корисного

навантаження мережі ( $k_{KH}$ ).

Коефіцієнт корисного навантаження мережі – це відношення швидкості передавання корисної інформації до системної швидкості з'єднання. Такий коефіцієнт дозволяє оцінити ефективність використання технологічних можливостей безпроводової мережі. Так, за результатами здійснених досліджень, рис.15, за сприятливих умов для режиму з шириною частотної смуги безпроводового каналу 40 МГц і системної швидкості 150 Мбіт/с,  $k_{KH}(2; 1500) = 0,366$ ,  $k_{KH}(2; 64) = 0,0238$ , а для режиму з шириною частотної смуги безпроводового каналу 20 МГц, 72 Мбіт/с –  $k_{KH}(2; 1500) = 0,308$ ,  $k_{KH}(2; 1500) = 0,0232$ . В дужках наведено кількість станцій (перша цифра) та приблизне значення обсягу корисного навантаження в одному кадрі даних (друга цифра).

Коефіцієнт корисного навантаження можна визначити для всіх можливих налаштувань безпроводової мережі. Цей коефіцієнт надає можливість оцінити, яку реальну максимальну пропускну здатність слід очікувати від мережі, що має певні налаштування і передає дані певного типу.

## ВИСНОВКИ

У дисертації отримано теоретичне узагальнення і нове вирішення науково-прикладного завдання, що полягає в розробленні методу прогнозування експлуатаційних характеристик та оцінювання якісних показників на підґрунті нової математичної моделі процесу передавання потоків даних для удосконалення процесу передавання аудіовізуального контенту засобами безпроводових мереж IEEE 802.11 з конкурентним доступом, з урахуванням вимог до якості наданих інформаційних послуг. У тому числі отримано нижченаведені результати.

1. Обґрунтовано, що наявні математичні моделі та методики розрахунку експлуатаційних характеристик не можуть забезпечити належне прогнозування значень експлуатаційних показників безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11 в режимі конкурентного доступу для забезпечення заданої якості обслуговування. В найбільш поширеній математичній моделі Дж. Б'янкі не встановлені безпосередні функціональні зв'язки між системними параметрами та експлуатаційними характеристиками. Для такої базової величини, як ймовірність колізії, зроблено припущення, що  $p_c \ll 1$ , що не має обґрунтування, а формула для визначення ймовірності успішного передавання втрачає фізичний смисл за умови  $p_c = 0,5$ . Модернізована модель для прогнозування характеристик мережі IEEE 802.11а має ті ж недоліки, що й попередня. В наявній моделі, створеній на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна, зроблені припущення, які не враховують всі функціональні зв'язки між параметрами мережі, що дозволяє лише якісно оцінити експлуатаційні характеристики.

2. Розроблено удосконалену математичну модель процесу передавання потоків даних у безпроводових мережах стандарту IEEE 802.11 з конкурентним доступом, що містить набір математичних співвідношень для прогнозування експлуатаційних характеристик безпроводової мережі. На відміну від попередніх, у цій моделі враховано функціональні зв'язки між системними параметрами (кількість активних станцій, кількість повторних спроб передавання, мінімальне значення конкурентного вікна) та стохастичними параметрами мережі (ймовірність колізій, ймовірність успішного передавання, ймовірність втрати пакету, кількість вільних часових слотів тощо). Показано, що в мережі з конкурентним доступом кількість станцій, що конкурують за канал, менше загальної кількості активних станцій внаслідок реалізації механізму повторного передавання кадрів даних.

3. Запропоновано метод оцінювання граничних значень експлуатаційних характеристик безпроводових мереж IEEE 802.11 в режимі конкурентного доступу, що ґрунтується на застосуванні удосконаленої математичної моделі. Отримано граничні значення пропускну здатності, середньої затримки передавання, нерівномірності середньої затримки, ймовірності втрати пакету для мереж IEEE 802.11а/n. З'ясовано, що в разі використання одного просторового каналу безпроводової мережі IEEE 802.11n у змішаному режимі з системною швидкістю 72 Мбіт/с або мережі IEEE 802.11а з системною

швидкістю 54 Мбіт/с, можна забезпечити передавання одночасно до 14 голосових з'єднань або передавання до 3 аудіовізуальних потоків зі звичайною роздільною здатністю з високою якістю надання послуги.

4. За результатами натурального експерименту встановлено, що запропонований метод оцінювання граничних значень експлуатаційних параметрів безпроводових мереж IEEE 802.11 з конкурентним доступом, забезпечує високу точність прогнозованих характеристик. Похибка прогнозування пропускної здатності безпроводової мережі не перевищує 10%, а середньої затримки – 7%, навіть за наявності великої кількості активних станцій в мережі.

5. Запропоновано метод оцінювання ефективності використання ресурсів безпроводової мережі із застосуванням коефіцієнту корисного навантаження мережі ( $k_{\text{кн}}$ ). За результатами досліджень, за сприятливих умов для режиму з шириною частотної смуги безпроводового каналу 40 МГц і системної швидкості 150 Мбіт/с,  $k_{\text{кн}}(2; 1500) = 0,366$ ,  $k_{\text{кн}}(2; 64) = 0,0238$ , а для режиму з шириною частотної смуги безпроводового каналу 20 МГц, 72 Мбіт/с  $k_{\text{кн}}(2; 1500) = 0,308$ ,  $k_{\text{кн}}(2; 1500) = 0,0232$ , метод дозволяє оцінити ефективність нових технічних рішень, спрямованих на удосконалення технології передавання даних засобами безпроводової мережі.

6. Для підвищення ефективності застосування безпроводових мереж IEEE 802.11 для передавання аудіовізуальної інформації за результатами дисертаційних досліджень можна рекомендувати:

- в місцях активного користування мережами робити просторово невеликі стільники з малою випромінюваною потужністю базових станцій, щоб запобігти одночасному передаванню кількох аудіовізуальних потоків через один канал;

- у разі наявності в мережі кількох станцій, що передають/приймають потокову інформацію відмовляти іншим станціям в обслуговуванні, якщо їх трафік призведе до неприпустимого погіршення експлуатаційних параметрів;

- оптимізувати правила адаптації параметрів мережі з урахуванням максимальної ефективності передавання мультимедійного контенту.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Lazebnyi V. S., Yin Ch. Estimation of probabilistic processes in wireless networks of 802.11 standard. *Мікросистеми, електроніка та акустика*. 2017. № 5. С. 47–53.

2. Лазебний В. С., Інч Ч. Оцінювання ефективності передавання аудіовізуальної інформації засобами безпроводової мережі 802.11n. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського Серія: «Технічні науки»*. 2018. Т. 29. № 4. Ч. 1. С. 73–82.

3. Лазебний В. С., Інч Ч., Омелянець О. О. Дослідження реальної пропускної спроможності безпроводової інформаційної мережі специфікації 802.11n. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського Серія: «Технічні науки»*. 2018. Т.29 (68) Ч. 1 № 5. С.155-160.

4. Лазебний В. С., Інч Ч. Оцінювання якісних показників бездротової мережі стандарту 802.11 з конкурентним доступом до каналу. *Всеукраїнський науковий збірник Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»*. 2018. № 1(31). С.78-88.

5. Лазебний В.С., Інч Ч. Визначення характеристик безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11 на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. Том 30 (69). Ч. 1, № 2. С. 61-68.

6. Інч Ч. Особенности публичных сетей беспроводного доступа на основе технологии Wi-Fi. *Електроніка-2015: Збірник статей 8 міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 15-17 квітня 2015)*. Київ. 2015. С.266-270.

7. Інч ЧеньЛянь. Оценивание вероятности коллизий в беспроводной сети WI-FI. *Електроніка – 2017: збірник статей 10 міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 25-27 квітня 2017 р.)*. Київ. 2017. С.286-289.

8. Інч Ч. Особенности функционирования беспроводной сети 802.11ac. *Сучасні проблеми застосування електронних та інформаційних технологій в телекомунікаціях, телебаченні та цифровому кінематографі: тези доповідей наук.-техн. конф. (Київ, 25 травня 2017 р.)*. Київ. 2017. с. 20-21.

9. Lazebnyi V., Yin Ch. Some aspects of wireless Wi-Fi network throughput calculation. *International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET): праці 14 міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 20-24 лютого 2018 р.)*. Львів. 2018. р.353-358.

10. Інч Ч. Применение концепции виртуального конкурентного окна для определения качественных показателей беспроводной сети стандарта 802.11. *Електроніка – 2018: збірник статей 11 міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 3 – 5 квітня 2018 р.)*. Київ. С. 447-450.

11. Інч Ч., Лазебний В. С. Застосування концепції віртуального конкурентного вікна для прогнозування пропускної здатності сегмента безпроводової мережі Wi-Fi. *Проблеми інформатизації та управління*. 2017. Том 4. № 60. С. 30–38.

12. Інч Ч., Омелянець О.О., Лазебний В.С. Аналіз показників успішності передавання звукових потоків засобами безпроводової мережі стандарту 802.11. *Електронна та акустична інженерія*. 2019. Т. 2. № 1. С. 43-49.

13. Інч Ч., Омелянець О.О., Лазебний В.С. Дослідження особливостей розповсюдження інформаційних відеопотоків мережами стандарту 802.11. *Електронна та акустична інженерія*, Т. 2. № 2. 2019. С. 30-35.

## АНОТАЦІЯ

**Інь Ченлян.** Дослідження та розроблення методики оцінювання ефективності передавання аудіо-візуальної інформації засобами безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Національний авіаційний університет, МОН України, Київ, 2019.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню актуального науково-технічного завдання – удосконаленню методів прогнозування експлуатаційних параметрів безпроводових комп'ютерних мереж стандарту IEEE 802.11.

Проаналізовано основні принципи функціонування безпроводових мереж IEEE 802.11a/g/n/ac, що функціонують частотних діапазонах 2,4 та 5 ГГц. З'ясовано причини обмеження рівня експлуатаційних параметрів таких мереж. Проаналізовано недоліки методик оцінювання експлуатаційних характеристик безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11 із застосуванням концепції часового слота.

В роботі запропоновано удосконалену математичну модель процесу передавання інформаційних потоків безпроводової мережею IEEE 802.11 у режимі конкурентного доступу. Для прогнозування експлуатаційних характеристик запропоновано метод, що ґрунтується на удосконаленій математичній моделі. Для оцінювання ефективності використання ресурсів безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11 запропоновано метод із застосуванням коефіцієнта корисного навантаження..

Теоретично та експериментально доведено ефективність запропонованих методів. Результати теоретичних і експериментальних досліджень впроваджені в навчальний процес.

**Ключові слова:** безпроводова комп'ютерна мережа, конкурентний доступ, колізії, пропускна здатність, затримка передавання, аудіовізуальна інформація.

## АННОТАЦИЯ

**Инь ЧеньЛянь.** Исследование и разработка методики оценки эффективности передачи аудиовизуальной информации средствами беспроводной сети стандарта IEEE 802.11. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Национальный авиационный университет, МОН Украины, Киев, 2019.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической задачи – совершенствованию методов прогнозирования эксплуатационных характеристик беспроводных компьютерных сетей стандарта IEEE 802.11.

Проанализированы основные принципы функционирования беспроводных сетей IEEE 802.11a/g/n/ac, которые функционируют в частотных диапазонах 2,4 и 5 ГГц. Выяснены причины ограничения уровня эксплуатационных параметров таких сетей. Проанализированы недостатки методик оценивания эксплуатационных характеристик беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11, основанных на концепции временного слота.

В работе предложена усовершенствованная математическая модель процесса передачи информационных потоков беспроводной сетью IEEE 802.11 в режиме конкурентного доступа. Для прогнозирования эксплуатационных характеристик предложен метод, основанный на применении усовершенствованной математической модели. Для оценки эффективности использования ресурсов беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 предложен метод, основанный на применении коэффициента полезной нагрузки.

Теоретически и экспериментально доказана эффективность предложенных методов и методики на их основе. Результаты теоретического и экспериментального исследований внедрены в учебный процесс.

**Ключевые слова:** беспроводная компьютерная сеть, конкурентный доступ, коллизии, пропускная способность, задержка передачи, аудиовизуальная информация.

## ANNOTATION

**Yin Chenliang. Research and development of methods for evaluating the transmission efficiency of audio-visual information by means of wireless networks of the IEEE 802.11 standard.** – On the rights of the manuscript.

Thesis for a Candidate of Science Degree in Specialty 05.13.05 – Computer Systems and Components. – National Aviation University, MES of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and technical problem - improvement of methods of forecasting of operational parameters of wireless computer networks of IEEE 802.11 standard.

The basic principles of IEEE 802.11a /g /n / ac wireless networks operating in the 2.4 and 5 GHz frequency bands are analyzed. The reasons for limiting the operational parameters of such networks have been clarified. The shortcomings of the methods for evaluating the performance of IEEE 802.11 wireless networks based on the time slot concept are analyzed.

The paper presents an improved mathematical model of the process of transmitting information streams via IEEE 802.11 wireless network in competitive access mode. An advanced mathematical model was developed based on the concept of a virtual contention window. This concept was proposed to determine the limit values of operational parameters in networks with saturated load of active stations. The basic idea behind the concept is that in saturated mode, when each station constantly tries to access a channel to transmit a data frame, the process of operating a wireless channel can be considered as a quasi-stationary random process. Due to this concept it possible to obtain functional dependencies for both a single station and

the wireless network segment as a whole. The process of occurrence of collisions is investigated and calculated ratios for quasi-stationary regime are obtained. It is justified that, due to conflicts, the number of stations competing for radio access is less than the total number of active stations in the network. It was proposed equations to determine, channel bandwidth, frame transmit delay, irregularity of delay (jitter), number of collisions occurring during virtual competitive window implementation, probability of successful transmission of data frame, probability of frame loss as a result of network transmission.

A method based on an improved mathematical model is proposed to predict performance of wireless network. Using this method, the performance characteristics of IEEE 802.11a / n networks with different number of active stations were investigated. Using this method, the performance characteristics of IEEE 802.11a / n networks with different number of active stations were investigated. The range of the stations number changing is from 2 to 14. The study was made for traffic whose data frames contain different payloads from 64 to 1500 bytes. The study was done for two types of TCP and UDP transport protocols. Two competitive network access modes are considered: unrivaled access mode and RTS and CTS frame mode. Compared to the channel bandwidth under ideal conditions in the event of collisions for UDP, bandwidth is reduced in RTS/CTS mode by 4.8% (frame load 1500 bytes) and 11.4% (frame load 64 bytes), and by 3% (1500) and 6.5% (64) for TCP.

To evaluate the effectiveness of IEEE 802.11 wireless network resources using, a method based on payload coefficient using is proposed. Network payload coefficient is the ratio of the rate of transmission of useful information to the system connection speed. This coefficient allows you to evaluate the efficiency of using the technological capabilities of the wireless network. Thus, according to the results of the conducted studies, under favorable conditions for the mode with the bandwidth of the wireless channel 40 MHz and the system speed of 150 Mbps,  $k_{kn}(1500) = 0,366$ , and for the mode with the bandwidth of the wireless channel 20 MHz, 72 Mbps with  $k_{kn}(1500) = 0.308$ . The brackets show the approximate amount of payload in a single data frame.

The effectiveness of the proposed methods is theoretically and experimentally proven. The results of theoretical and experimental studies are applied in the educational process.

**Keywords:** wireless computer network, competitive access, collisions, throughput, transmission delay, audiovisual information.