

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Омельянець Олександра Олександрівна

УДК 621.38

ДИСЕРТАЦІЯ
ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОННОЇ БЕЗПРОВОДОВОЇ СИСТЕМИ
ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ

171 Електроніка
17 Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і

текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____/О. О. Омельянець

Науковий керівник Лазебний Володимир Семенович, кандидат технічних наук,
доцент

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Омельянець О. О. Вплив технологічних параметрів на експлуатаційні характеристики електронної безпроводової системи передавання даних. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 «Електроніка». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2025.

В дисертації отримано такі нові наукові результати:

1. Отримав подальший розвиток метод дослідження експлуатаційних характеристик безпроводових мереж на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна для визначення показників якості передавання мультимедійного трафіка в змішаних мережах з пріоритизацією;

2. Удосконалено метод оцінювання впливу технологічних параметрів на граничні експлуатаційні характеристики електронної безпроводової системи передавання даних за стандартом IEEE 802.11 ac в режимі конкурентного доступу.

3. Вперше обґрунтовано оцінки ефективності технологічних рішень, застосованих для підвищення пропускну здатності безпроводової електронної системи передавання даних за стандартом IEEE 802.11 ac за умов обмеженого енергетичного ресурсу.

4. Отримала подальший розвиток теорія функціонування безпроводової мережі передавання даних з конкурентним доступом в режимі пріоритизації трафіку.

Дисертаційну роботу присвячено поглибленому дослідженню впливу технологічних параметрів на експлуатаційні характеристики електронної безпроводової системи передавання даних за специфікацією 802.11ac для удосконалення процесу проектування і експлуатації зазначених мереж шляхом врахування гранично можливого рівня якісних показників.

В роботі використано метод аналізу, що ґрунтується на концепції віртуального конкурентного вікна, який дозволяє врахувати всі технологічні параметри для моделювання процесів в електронних системах передавання даних.

Зміст дисертаційного дослідження викладений у п'яти розділах, у яких подано результати теоретичних і експериментальних досліджень.

У вступі дисертаційної роботи обґрунтовано доцільність і актуальність обраного напрямку досліджень. Показано, що технології безпроводових локальних мереж стандарту IEEE 802.11 (Wi-Fi) набули значного поширення як засіб створення локальних мереж обміну даними і засіб доступу до ресурсів Інтернет. З часу створення у 1997 році технології фізичного і канального рівнів мереж IEEE 802.11 зазнали суттєвих змін і удосконалення. Удосконалення спрямовані на збільшення пропускної здатності мережі і поліпшення якісних показників. В межах одного стандарту IEEE 802.11 кожен його модифікацію оформлено окремою специфікацією, що є невід'ємним складником стандарту. Зараз найбільш поширеними специфікаціями є 802.11 n, ас і слід очікувати, що така ситуація збережеться протягом тривалого часу. Запроваджується обладнання для безпроводових мереж за специфікацією 802.11 ах, що суттєво відрізняється від попередніх версій, в якій використано систему множинного доступу OFDMA. На стадії стандартизації знаходиться технологія IEEE 802.11 be.

Дослідженню процесів в мережах передавання даних присвячено багато дослідницьких робіт, але отримані в них результати часто є суперечливими або отримані за спрощеною схемою.

Особливість мереж IEEE 802.11ас є розширення частотного діапазону частотних каналів, застосування багатопотокового передавання даних, застосування квадратурної модуляції носійних частот OFDM символу квадратурною модуляцією збільшеної кратності. Технологія мереж IEEE 802.11ас є останньою і найбільш досконалою технологією із

застосуванням модуляції OFDM. Проведені в дисертаційній роботі дослідження дозволять більш ефективно використовувати можливості зазначеної технології.

В першому розділі наведено результати критичного аналізу особливостей технічних рішень передбачених специфікацією IEEE 802.11ac. Зокрема розглянуто питання доступу до середовища, частотні ресурси, можливі для застосування, спосіб організації частотних каналів в межах діапазону 5 ГГц, розподіл часу і тривалості часових інтервалі під час конкурентного доступу до каналу, особливості радіоканалу і характеристики систем модуляції і кодування. Також проаналізовано структуру кадру без агрегування і агрегованого кадру. Окремо розглянуто структуру електронної системи передавання даних і особливості її апаратної реалізації. На завершення першого розділу наведено результати огляду досліджень експлуатаційних характеристик мереж IEEE 802.11ac, оприлюднених в науково-технічних інформаційних джерелах.

Другий розділ присвячено теоретичному оцінюванню експлуатаційних характеристик мереж IEEE 802.11ac.

Перш за все обґрунтовано метод подальших досліджень. На підставі аналізу методів часового слоту, запропонованого Дж. Б'янкі, і методу, що ґрунтується на концепції віртуального конкурентного вікна, обрано останній оскільки в цьому методі сформовано математичну модель, в якій установлені однозначні залежності між системними параметрами і експлуатаційними характеристиками.

Із застосуванням методу віртуального конкурентного вікна зроблено теоретичні дослідження пропускної здатності безпроводового каналу в разі використання частотних смуг 20, 40, 80, 160 МГц для мереж без конкуренції (одна станція з насиченим навантаженням) і для режиму конкурентного доступу з числом станцій від 2 до 16. В дослідженні розглянуто режими модуляції і кодування від MCS5 до MCS9. Отримано оцінки для затримки передавання і її нерівномірності.

З'ясовано, що зі збільшенням кількості активних станцій у мережі зростає ймовірність того, що не всі станції зможуть передати свої кадри з використанням

семи (першої і шести повторних) наданих спроб. Залежно від типу кадрів і налаштування мережі такі кадри можуть бути відкинуті або будуть продовжені спроби їх передати.

Зі збільшенням кількості активних станцій у безпроводовій мережі сумарна пропускна здатність зростає в інтервалі від однієї до чотирьох станцій внаслідок зменшення усередненої величини конкурентного вікна, а потім зменшується через виникнення колізій, тим швидше, чим більше станцій у мережі. Збільшення ширини частотної смуги безпроводового каналу в однопотоковому режимі є не дуже ефективним засобом збільшення пропускної здатності каналу за відсутності агрегування пакетизованого потоку даних.

В разі застосування агрегованих кадрів для передавання насиченого трафіку (наприклад, «закачка» великих файлів) пропускна здатність безпроводового каналу значно зростає. Якщо застосувати агрегування вхідних файлів PSDU до максимального рівня передбаченого в специфікації IEEE802.11ac (11454 байти) пропускна здатність каналу зростає і перевищує 50, максимальної теоретично розрахованої величини в каналах 20 і 40 МГц.

Третій розділ присвячено дослідженню зони обслуговування точки доступу. Визначено радіус зони обслуговування для станції з випромінюваною потужністю 100 мВт для всіх можливих режимів модуляції і кодування MCS0 – MCS9. Проведено розрахунки радіусу зони обслуговування в разі застосування кількох просторових потоків для передавання даних.

З'ясовано, що розмір зони обслуговування залежить від застосованого в мережі режиму модуляції й кодування, і радіус зони може змінюватись до десяти разів. Цей розмір залежить також від ширини частотної смуги радіоканалу і зменшується вдвічі, у разі збільшення частотної смуги в чотири рази. Хоча в діапазоні 5ГГц сигнали частотних смуг окремих каналів на рівні «мінус»20 дБ майже не перекриваються, внаслідок відносно великої інтенсивності позасмугового випромінювання і великої чутливості приймачів, у суміжних частотних каналах можуть виникати помітні взаємні завади під час передавання преамбули попередніх специфікацій стандарту, що зменшує ефективність

використання каналного ресурсу.

У четвертому розділі розглянуто питання пов'язані з передаванням голосового трафіку в мережах IEEE 802.11ac зі змішаним навантаженням. Наведено результати порівняльного аналізу кодеків для застосування в IP-мережах. Розглянуто особливості генерування голосового трафіку і зроблено розрахунок максимально можливої кількості голосових з'єднань в мережі з однією точкою доступу. Для розрахунку використано характеристики найменш ефективного кодеку G.711.

Теоретично досліджено функціонування мереж зі змішаним трафіком, в одній із яких пріоритизований трафік складається із насиченого низькопріоритетного трафіку типу «background» і високопріоритетного голосового трафіку (voice over IP), а в іншій – із насиченого трафіку загального пріоритету «best effort» і високопріоритетного голосового трафіку. Обґрунтовано можливість організації великої кількості (кілька десятків) голосових з'єднань через одну точку доступу. З урахуванням того, що технологію IEEE 802.11ac призначено для використання в приміщеннях в межах відносно невеликої зони обслуговування, вона є надійним засобом організації голосових з'єднань.

У п'ятому розділі наведено результати експериментальних досліджень пропускної здатності безпроводового каналу IEEE 802.11ac в реальних умовах. Для дослідження використано стаціонарний комп'ютер, як файлообмінний сервер локальної мережі, два ноутбуки, один із яких з однією приймально/передавальною антеною, а інший – з двома, смартфони. Вимірювання пропускної здатності мережі здійснено програмними засобами OpenWrt, Wi-Fi Analyzer, SpeedTest.

Визначено, що при передаванні насиченого трафіку точки доступу здійснюють агрегування файлів, максимальна величина яких визначається налаштуваннями виробника. Практичні вимірювання підтвердили результати теоретичних досліджень. Під час експериментів отримано оцінки впливу неузгодженості антен абонентської станції і точки доступу, а також вплив умов

багатопроменевого розповсюдження на рівень сигналу на вході абонентської станції. Зроблено експерименти щодо організації голосових з'єднань з чотирма смартфонами в мережі з насиченим трафіком, які підтвердили висновки теоретичних розрахунків.

Отримані результати досліджень мають практичне значення і можуть бути ефективно застосовані для проектування, планування та обслуговування безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11ac, зі змогою сформувати прогнозну оцінку швидкості передавання даних, для обґрунтованого планування і розгортання безпроводових VoIP мереж, у навчальному процесі в дисциплінах, пов'язаних з організацією і функціонуванням безпроводових локальних мереж передавання даних за стандартом IEEE 802.11ac.

Ключові слова: апаратні засоби, випромінювана потужність, зона обслуговування, електромагнітна сумісність, електронна система, контент, оцінка ефективності, мережні технології, пропускна здатність, спосіб модуляції і кодування, ширина частотної смуги.

SUMMARY

Omelyanets O. Influence of technological parameters on operational characteristics of an electronic wireless data transmission system. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 171 "Electronics". – National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Ihor Sikorskyi", MES of Ukraine, Kyiv, 2024.

The following new scientific results were obtained in the dissertation:

The method of studying the operational characteristics of wireless networks based on the concept of a virtual competitive window for determining the quality indicators of multimedia traffic transmission in mixed networks with prioritization has been further developed;

The method for assessing the influence of technological parameters on the marginal performance characteristics of an electronic wireless data transmission system according to the IEEE 802.11 ac standard in the competitive access mode has been improved;

For the first time, assessments of the effectiveness of technological solutions used to increase the throughput of a wireless electronic data transmission system according to the IEEE 802.11 ac standard under conditions of limited energy resources have been substantiated;

The theory of the functioning of a wireless data transmission network with competitive access in traffic prioritization mode has been further developed.

The dissertation is devoted to an in-depth study of the influence of technological parameters on the operational characteristics of an electronic wireless data transmission system according to the 802.11ac specification to improve the process of designing and operating these networks by taking into account the maximum possible level of quality indicators.

The work uses an analysis method based on the concept of a virtual competitive window, which allows taking into account all technological parameters for modeling processes in electronic data transmission systems.

The content of the dissertation research is presented in five chapters, which present the results of theoretical and experimental research.

In the introduction of the dissertation, the expediency and relevance of the chosen direction of research are substantiated. It is shown that wireless LAN technologies of the IEEE 802.11 standard (Wi-Fi) have become widely used as a means of creating local data exchange networks and a means of accessing Internet resources. Since its creation in 1997, the physical and channel layer technologies of IEEE 802.11 networks have undergone significant changes and improvements. Improvements are aimed at increasing network throughput and improving quality indicators. Within one IEEE 802.11 standard, each of its modifications is framed by a separate specification, which is an integral part of the standard. Currently, the most common specifications are 802.11 n, ac, and this situation should be expected to remain for a long time. Equipment for wireless networks according to the 802.11 ax specification is being introduced, which is significantly different from the previous versions, which used the OFDMA multiple access system. The IEEE 802.11 be technology is at the standardization stage.

Many research works are dedicated to the study of processes in data transmission networks, but the results obtained in them are often contradictory or obtained according to a simplified scheme.

A feature of IEEE 802.11ac networks is the expansion of the frequency range of frequency channels, the use of multi-stream data transmission, the use of quadrature modulation of carrier frequencies of the OFDM symbol by quadrature modulation of increased multiplicity. IEEE 802.11ac networking technology is the latest and most advanced technology using OFDM modulation. The research conducted in the dissertation work will allow more effective use of the capabilities of the specified technology.

The first section presents the results of a critical analysis of the features of the technical solutions provided by the IEEE 802.11ac specification. In particular, the issue of access to the environment, frequency resources possible for use, the method of organizing frequency channels within the 5 GHz range, the distribution of time and the duration of time intervals during competitive access to the channel, the peculiarities of the radio channel and the characteristics of modulation and coding systems are considered. The structure of the frame without aggregation and the aggregated frame was also analyzed. The structure of the electronic data transmission system and the features of its hardware implementation are considered separately. At the end of the first chapter, the results of the review of the operational characteristics of IEEE 802.11ac networks published in scientific and technical information sources are given.

The second section is devoted to theoretical evaluation of operational characteristics of IEEE 802.11ac networks.

First of all, the method of further research is substantiated. Based on the analysis of the time slot methods proposed by J. Bianchi and the method based on the concept of the virtual competitive window, the latter was chosen because in this method a mathematical model was formed in which unambiguous dependencies between system parameters and operational characteristics were established.

With the application of the virtual competitive window method, theoretical studies of the bandwidth of the wireless channel were carried out in the case of using frequency bands of 20, 40, 80, 160 MHz for networks without competition (one station with a saturated load) and for the competitive access mode with the number of stations from 2 to 16. Modulation and coding modes from MCS5 to MCS9 are considered in the study. Estimates are obtained for transmission delay and its non-uniformity.

It is found that as the number of active stations in the network increases, the probability that not all stations will be able to transmit their frames using the seven (first and six retries) given attempts increases. Depending on the frame type and network configuration, such frames may be dropped or continued attempts to transmit them.

As the number of active stations in a wireless network increases, the total throughput increases in the interval from one to four stations due to a decrease in the average size of the contention window, and then decreases due to the occurrence of collisions, the faster the more stations in the network. Increasing the frequency bandwidth of a wireless channel in single-stream mode is not a very effective means of increasing the bandwidth of the channel in the absence of aggregation of the packetized data stream.

In the case of using aggregated frames for transmitting saturated traffic (for example, "uploading" large files), the bandwidth of the wireless channel increases significantly. If aggregation of incoming PSDU files is applied to the maximum level stipulated in the IEEE802.11ac specification (11454 bytes), the channel bandwidth increases and exceeds 50, the maximum theoretically calculated value in 20 and 40 MHz channels.

The third section is devoted to the study of the service area of the access point. The radius of the service area for a station with a radiated power of 100 mW for all possible modes of modulation and coding MCS0 – MCS9 is determined. Calculations of the radius of the service area in the case of using several spatial streams for data transmission have been carried out.

It was found that the size of the service area depends on the modulation and coding mode used in the network, and the radius of the area can vary up to ten times. This size also depends on the width of the frequency band of the radio channel and is halved if the frequency band is increased four times. Although in the 5 GHz range, the signals of the frequency bands of individual channels at the level of "minus" 20 dB almost do not overlap, due to the relatively high intensity of out-of-band radiation and the high sensitivity of receivers, noticeable mutual interference may occur in adjacent frequency channels during the transmission of the preamble of the previous specifications of the standard, which reduces efficiency of channel resource use.

In the fourth chapter, issues related to the transmission of voice traffic in IEEE 802.11ac networks with mixed load are considered. The results of a comparative

analysis of codecs for use in IP networks are presented. The features of voice traffic generation were considered and the maximum possible number of voice connections in a network with one access point was calculated. The characteristics of the least efficient G.711 codec were used for the calculation.

The functioning of networks with mixed traffic is theoretically investigated, in one of which the prioritized traffic consists of saturated low-priority traffic of the "background" type and high-priority voice traffic (voice over IP), and in the other – of saturated traffic of the general priority "best effort" and high-priority voice traffic. The possibility of organizing a large number (several tens) of voice connections through one access point is substantiated. Given that IEEE 802.11ac technology is intended for indoor use within a relatively small service area, it is a reliable means of organizing voice connections.

The fifth chapter presents the results of experimental studies of the bandwidth of the IEEE 802.11ac wireless channel in real conditions. A stationary computer, as a local network file sharing server, two laptops, one with one receiving/transmitting antenna, and the other with two, smartphones were used for the research. Network bandwidth was measured using OpenWrt, Wi-Fi Analyzer, and SpeedTest software.

It was determined that when transmitting saturated traffic, access points aggregate files, the maximum size of which is determined by the manufacturer's settings. Practical measurements confirmed the results of theoretical studies. During the experiments, we obtained estimates of the influence of the mismatch between the antennas of the subscriber station and the access point, as well as the influence of multipath propagation conditions on the signal level at the input of the subscriber station. Experiments were conducted on the organization of voice connections with four smartphones in a network with saturated traffic, which confirmed the conclusions of theoretical calculations.

The obtained research results are of practical importance and can be effectively applied to the design, planning and maintenance of wireless networks of the IEEE 802.11ac standard, with the ability to form a predictive assessment of data transmission

speed, for reasonable planning and deployment of wireless VoIP networks, in the educational process in disciplines related to the organization and operation of wireless local networks for data transmission according to the IEEE 802.11ac standard.

Key words: hardware, radiated power, service area, electromagnetic compatibility, electronic system, content, performance assessment, bandwidth, modulation and coding method, frequency bandwidth, network technologies.

Список публікацій здобувача:

1. O.O. Omelianets. Evaluation of the Limitation of Operational Parameters of the IEEE 802.11 ac Network in the 20MHz Channel/ O.O. Omelianets, V.S. Lazebnyi // April 2024 Microsystems Electronics and Acoustics 29(1) / DOI:10.20535/2523-4455.me.297580
2. Омелянець О. О. Електромагнітна сумісність безпроводових мереж IEEE 802.11ac / О. О. Омелянець, В. С. Лазебний, // Технології та інжиніринг. - 2024. - № 1 (18). - С. 67-76/ DOI: [10.30857/2786-5371.2024.1.7](https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.1.7) – URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/26213>
3. О.О Омелянець. Особливості передавання голосовго трафіка засобами безпроводової мережі IEEE 802.11 ac/ Омелянець О.О., Лазебний В.С.// Радіотехніка, №216, 2024р., 94–102/ <https://doi.org/10.30837/rt.2024.1.216.09>
4. Лазебний В.С., Інъ Ченлян, Омелянець О.О. Дослідження реальної пропускної спроможності безпроводової інформаційної мережі специфікації IEEE 802.11 n. // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки, № 5 Part 1, Vol. 29 (68), pp. 155-160, 2018 – URL: <https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/archive?id=38>
5. О.О Омелянець. Оцінювання експлуатаційних характеристик мережі IEEE 802.11 ac з каналом 20МГц/Омелянець О.О., Лазебний В.С. //V International Scientific and Practical Conference «RICERCHE SCIENTIFICHE E METODI DELLA LORO REALIZZAZIONE: ESPERIENZA MONDIALE E REALTÀ DOMESTICHE» "ΛΟΓΟΣ", с.221-230/ <https://doi.org/10.36074/logos-26.04.2024.046>
6. О.О Омелянець. Особливості застосування безпроводних мереж IEEE 802.11 ac для передавання голосового трафіка /Омелянець О.О., Лазебний В.С. //VI International Scientific and Theoretical Conference «Theoretical and practical scientific achievements: research and results of their implementation», Болонья, Італія, 26 квітня 2024, Collection of scientific papers "SCIENTIA", с.100-107/ <https://doi.org/10.36074/scientia-26.04.2024>

7. Омелянець О. О. Дослідження особливостей розповсюдження інформаційних відеопотоків мережами стандарту 802.11 / Інъ Ченлян, Омелянець О. О., Лазебний В. С. // Електронна та Акустична Інженерія : науково-технічний журнал. – 2019. – Т. 2, № 2. – С. 30–35. – Бібліогр.: 14 назв. – URI: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/33664> DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-0965.2019.2.2.163110>

8. Омелянець О.О. Аналіз показників успішності передавання звукових потоків засобами безпроводової мережі стандарту 802.11, Інъ Ченлян, Лазебний В.С., Омелянець О.О./ Електронна та Акустична Інженерія, 2(1), 43–49, 2019, <https://doi.org/10.20535/2617-0965.2019.2.1.163109>, <http://feltran.kpi.ua/article/view/163109>

ЗМІСТ

Перелік позначень і скорочень	18
ВСТУП.....	20
1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖ IEEE802.11AC НА ФІЗИЧНОМУ І КАНАЛЬНОМУ РІВНЯХ	27
1.1 Загальна характеристика технічних особливостей специфікації IEEE 802.11 ac	27
1.2 Особливості організації доступу до середовища передавання в мережах стандарту IEEE 802.11ac	27
1.3 Розподіл часу в режимі конкурентного доступу в мережах за специфікацією IEEE 802.11ac	31
1.4 Особливості радіоканалу мережі IEEE 802.11ac.....	34
1.5 Структура кадру	37
1.6 Зона обслуговування.....	39
1.7 Особливості технічної реалізації безпроводової електронної системи передавання даних.....	40
1.8 Огляд результатів досліджень експлуатаційних характеристик мереж IEEE 802.11ac.....	44
Висновки до розділу	48
2 ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ IEEE 802.11ac	51
2.1 Методологія дослідження.....	51
2.2 Експлуатаційні характеристики мережі з каналом 20 МГц.....	53
2.3 Пропускна здатність мережі з розширеними частотними каналами	67
2.4 Пропускна здатність мережі з максимальним навантаженням агрегованими кадрами.....	75
Висновки до розділу	80
3 Зона обслуговування і ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ IEEE 802.11AC	83
3.1 Особливості зони обслуговування точки доступу безпроводової мережі	83
3.2 Зона обслуговування точки доступу в режимі МІМО	87
3.3 Взаємний вплив суміжних мереж на параметри фізичного рівня	93

Висновки до розділу	95
4 ОСОБЛИВОСТЕЙ ПЕРЕДАВАННЯ ГОЛОСОВОГО ТРАФІКУ ЗАСОБАМИ МЕРЕЖ IEEE802.11AC	97
4.1 Загальні підходи до передавання голосового трафіку IP мережами	97
4.3 Розрахунок часу передавання голосових кадрів за різних режимів модуляції і кодування	100
4.4 Передавання голосового трафіка в мережах зі змішаним навантаженням .	105
4.5 Характеристики мережі в режимі «найкраща спроба»	112
Висновки до розділу	123
5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗПРОВОДОВОГО КАНАЛУ ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ.....	125
5.1 Організація і планування експериментальних досліджень	125
5.2 Оцінювання впливу взаємного орієнтування приймальних і передавальних антен станцій безпроводової мережі	125
5.3 Оцінювання пропускної здатності безпроводового каналу мережі передавання даних стандарту IEEE802.11ac	128
Висновки до розділу	138
ВИСНОВКИ.....	140
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	143
Додаток А.....	152
Додаток Б.....	159

Перелік позначень і скорочень

ACK	– Acknowledgment – кадр-підтвердження успішного приймання кадру даних
AIFS	Arbitration Interframe Space – арбітражний міжкадровий проміжок (часовий інтервал)
BA	– Block Acknowledgment – кадр-підтвердження успішного приймання блоку кадрів даних
BE	– Best Effort (AC_BE) – «найкраща спроба»; режим передавання даних із загальним пріоритетом
BK	– Background (AC_BK) – «фоновий режим»; режим передавання даних із низьким пріоритетом
CCA	– Clear-Channel Assessment – технологія оцінювання рівня зовнішнього випромінювання в каналі
CTS	– clear to send – вільний для передавання, службовий кадр-відповідь станції-адресата
CW	– contention window – конкурентне вікно; множина чисел, що визначає затримку перед початком передавання кадру
DCF	– Distributed coordination function – розподілена функція координації; функція, що визначає спосіб доступу до середовища передавання
DIFS	– DCF Interframe Space – міжкадровий проміжок, визначений розподіленою функцією керування
IEEE 802.11ac	– специфікація безпроводової мережі в наборі протоколів родини IEEE 802.11 для організації локальних мереж (WLAN) високої пропускну здатності в діапазоні 5 ГГц.
L-LTF	– Legacy long training field – спадкове довге тренувальне поле
LP	– Legacy preamble – спадкова преамбула
L-SIG	– спадкове поле сигналізації в преамбулі кадру даних
L-STF	– Legacy short training field – спадкове коротке тренувальне поле
MAC	– Medium Access Control – керування доступом до спільного середовища передавання даних
MCS	– Modulation Coding Scheme – схема модуляції і кодування
MIMO	– Multiple-Input Multiple-Output – технологія передавання інформаційних потоків з одночасним застосуванням кількох передавальних і кількох приймальних антен
MU-MIMO	– multi-user, multi-in multi-out – метод передавання інформації кільком користувачам із застосуванням кількох передавальних і приймальних антен
OFDM	– Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – це метод ущільнення угрупованням ортогональних частот, система багаточастотної модуляції і кодування

OFDMA	– Orthogonal Frequency-Division Multiple Access – це метод передавання інформації багатьом користувачам одного радіоспектра з розподілом угруповання ортогональних частот
QAM-256	– Quadrature Amplitude Modulation – квадратурна амплітудна модуляція, різновид одночастотної багаторівневої (256 рівнів) модуляції
RST	– Request to send – запит на передавання, службовий кадр-повідомлення
SIFS	– Short Interframe Space – короткий міжкадровий проміжок
SoC	– System-on-Crystal – складна електронна система, реалізована на одному кристалі
ST	– ST (slot time) – часовий слот; інтервал фіксованої тривалості для формування затримки передавання кадру
VCW	– Virtual contention window – віртуальне конкурентне вікно; стохастичний параметр безпроводової мережі Wi-Fi у режимі насиченого навантаження
VHT	– Very High Throughput – технологія безпроводових мереж з дуже високою пропускнуою спроможністю
VO	– Voice (AC_VO) – «пріоритет голосового повідомлення»; високий пріоритет передавання кадру даних
VoIP	– Voice over IP (голос через IP) – технологія передавання голосового трафіку у реальному часі із застосуванням родини протоколів TCP/IP.
Wi-Fi	– Wireless Fidelity, Wi-Fi, WiFi (безпроводова точність відтворення) – торгова марка міжнародної організації Wi-Fi Alliance та загальноживана назва для стандарту IEEE 802.11

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. В наш час електронні системи передавання даних використовують в усіх сферах діяльності. Такі системи складаються з електронних пристроїв оброблення інформаційних потоків і ліній зв'язку. Поширеним терміном, для такої системи є «мережа передавання даних». Широкого застосування набули як проводові мережі передавання даних, так і безпроводові мережі передавання даних, в яких носієм сигналів є електромагнітні хвилі, що розповсюджуються в навколишньому середовищі.

Можливості електронних систем передавання даних залежать від алгоритму функціонування системи (доступ до середовища передавання, пріоритизація трафіку), застосованих алгоритмів оброблення даних і формування електричних сигналів (модуляція, протизавадне кодування, шифрування, спосіб передавання сигналів), а також від технічних можливостей реалізувати зазначені алгоритми електронними апаратними засобами.

Одним із різновидів електронних систем передавання даних є мережі побудовані згідно зі стандартом IEEE 802.11.

Технології безпроводових локальних мереж стандарту IEEE 802.11 (Wi-Fi) набули значного поширення як засіб створення локальних мереж обміну даними і засіб доступу до ресурсів Інтернет. З часу створення у 1997 році технології фізичного і канального рівнів мереж IEEE 802.11 зазнали суттєвих змін і удосконалення. Удосконалення спрямовані на збільшення пропускну здатності мережі і поліпшення якісних показників. В межах одного стандарту IEEE 802.11 кожен його модифікацію оформлено окремою специфікацією, що є невід'ємним складником стандарту. Зараз найбільш поширеними специфікаціями є 802.11 n, ас. Запроваджується обладнання для безпроводових мереж за специфікацією 802.11 ах, що суттєво відрізняється від попередніх версій, в якій використано систему множинного доступу OFDMA. На стадії стандартизації знаходиться технологія IEEE 802.11 be.

Важливою особливістю технологій IEEE 802.11 є зворотна сумісність. Тобто обладнання, що функціонує за новими специфікаціями є сумісним з обладнанням попередніх версій. Основним принципом функціонування мереж IEEE 802.11 є принцип конкурентного доступу, за якого всі користувачі безпроводової мережі мають однакові права доступу до середовища передавання інформації. Такий спосіб доступу призводить до виникнення колізій в мережах з великою кількістю користувачів, що ускладнює процес функціонування мережі і призводить до деградації якісних показників.

Моделюванню процесів в безпроводових мережах присвячено багато робіт, але через складність цих процесів практичні рекомендації щодо планування безпроводових мереж часто ґрунтуються на результатах натурних вимірювань і попередньо набутого досвіду. Для того, щоб краще уявляти вплив окремих чинників на функціонування безпроводової мережі і тим самим поліпшити процес проектування таких мереж необхідно удосконалювати методи дослідження з урахуванням усіх чинників, що впливають на експлуатаційні характеристики. Деякі результати наших попередніх досліджень безпроводової мережі 802.11n наведено в [1]. В межах дисертаційної роботи досліджено основні характеристики мережі 802.11ac і отримано оцінки ефективності удосконалених технічних рішень запропонованих в цій специфікації.

У діапазоні 2,4 ГГц сигнали Wi-Fi мереж розповсюджуються на більшу відстань, ніж в діапазоні 5 ГГц, але наявність великої кількості джерел випромінювання і міжмережних завад спонукає розробників пропонувати користувачам надавати перевагу діапазону 5 ГГц [2]. У діапазоні 5 ГГц функціонує значно менше технічних систем, що можуть бути джерелами завад для мереж Wi-Fi, а крім цього в зазначеному діапазоні можна організувати більше частотних каналів без перекриття частотних смуг порівняно з діапазоном 2,4 ГГц. Проте, в діапазоні 5 ГГц реальні характеристики мереж суттєво відрізняються від задекларованих [3]. Стандарт IEEE 802.11 призначено для організації безпроводових мереж на фізичному і каналному рівнях моделі

OSI. Питанням щодо функціонування мереж IEEE 802.11 на канальному рівні присвячено багато досліджень, а питання функціонування мережі на фізичному рівні залишається здебільшого поза увагою фахівців. Водночас процеси, що мають місце на фізичному рівні, суттєво впливають на характеристики мережі і їх врахування може забезпечити кращі експлуатаційні показники мережі в цілому, що й визначає актуальність проведених досліджень.

Метою дисертаційної роботи є зробити поглиблене дослідження впливу технологічних параметрів на експлуатаційні характеристики електронної безпроводової системи передавання даних за специфікацією 802.11ac для удосконалення процесу проектування і експлуатації зазначених мереж шляхом врахування гранично можливого рівня якісних показників.

Для досягнення мети дисертаційної роботи необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити експлуатаційні характеристики мережі в режимі конкурентного доступу залежно від застосованого режиму функціонування;
- проаналізувати параметри зони обслуговування точки доступу мережі стандарту IEEE 802.11ac, залежно від параметрів модуляції й кодування, а також взаємний вплив суміжних мереж стандарту IEEE 802.11 на стабільність їх функціонування;
- дослідити ефективність застосування технології формування променів та технології багатопотокового передавання даних (MIMO) за умови обмеженої випромінюваної потужності точки доступу;
- дослідити ефективність застосування пріоритизації трафіку в мережах зі змішаним трафіком;
- зробити експериментальну перевірку отриманих результатів.

Об'єктом дослідження є безпроводові електронні системи передавання даних.

Предметом дослідження є вплив технологічних параметрів на експлуатаційні характеристики електронної безпроводової системи передавання даних за стандартом IEEE 802.11ac.

Методи дослідження. Для визначення напрямів досліджень застосовано критичний аналіз наукових матеріалів за темою дисертації; порівняльний аналіз застосовано для вибору методу дослідження процесів в безпроводових мережах передавання даних з конкурентним доступом; для визначення експлуатаційних характеристик застосовано метод оцінювання процесів в безпроводових мережах передавання даних, що ґрунтується на концепції віртуального конкурентного вікна; теорія ймовірностей для оцінювання процесів передавання аудіо інформації в мережах зі змішаним навантаженням, метод натурного експерименту для підтвердження достовірності отриманих результатів.

Особистий внесок здобувача. В роботах теоретичного характеру за темою дисертації здобувачу належить обґрунтування і планування напрямів досліджень, здійснення теоретичних досліджень і інтерпретація результатів. В роботі експериментального характеру здобувач брав участь в організації експерименту, аналізі і інтерпретації результатів.

Наукова новизна.

1. Отримав подальший розвиток метод дослідження експлуатаційних характеристик безпроводових мереж на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна для визначення показників якості передавання мультимедійного трафіка в змішаних мережах з пріоритизацією;

2. Удосконалено метод оцінювання впливу технологічних параметрів на граничні експлуатаційні характеристики електронної безпроводової системи передавання даних за стандартом IEEE 802.11 ac в режимі конкурентного доступу.

3. Вперше обґрунтовано оцінки ефективності технологічних рішень, застосованих для підвищення пропускної здатності безпроводової електронної системи передавання даних за стандартом IEEE 802.11 ac за умов обмеженого енергетичного ресурсу.

4. Отримала подальший розвиток теорія функціонування безпроводової мережі передавання даних з конкурентним доступом в режимі пріоритезації трафіку.

Практична значимість роботи полягає в можливості використання отриманих результатів:

1. Для проектування, планування та обслуговування безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11ac, зі змогою сформувавши прогнозу оцінку швидкості передавання даних, залежно від місця розташування користувацької станції в зоні обслуговування точки доступу та наявних перешкод на шляху розповсюдження OFDM сигналу і від наявності інших, близько розташованих мереж IEEE 802.11.

2. Для обґрунтованого планування і розгортання безпроводових VoIP мереж.

3. Для прийняття рішення щодо вибору обладнання для організації безпроводової мережі за стандартом IEEE 802.11ac.

4. У навчальному процесі в дисциплінах, пов'язаних з організацією і функціонуванням безпроводових локальних мереж передавання даних за стандартом IEEE 802.11ac.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи оприлюднено у 8 наукових роботах, у тому числі у 4 статтях фахових виданнях України категорії Б, 2 доповіді на міжнародних конференціях і 2 доповіді на Всеукраїнських конференціях.

Під час навчання в аспірантурі основні положення та результати дисертаційної роботи висвітлено в таких публікаціях:

1. O.O. Omelianets. Evaluation of the Limitation of Operational Parameters of the IEEE 802.11 ac Network in the 20MHz Channel/ O.O. Omelianets, V.S. Lazebnyi // April 2024Microsystems Electronics and Acoustics 29(1) / DOI:10.20535/2523-4455.me.297580

2. Омелянець О. О. Електромагнітна сумісність безпроводових мереж IEEE 802.11ac / О. О. Омелянець, В. С. Лазебний, // Технології та інжиніринг. –

2024. – № 1 (18). – С. 67-76/ DOI: [10.30857/2786-5371.2024.1.7](https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.1.7) – URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/26213>

3. О.О Омелянець. Особливості передавання голосовго трафіка засобами безпроводової мережі IEEE 802.11 ас/ Омелянець О.О., Лазебний В.С.// Радіотехніка, №216, 2024р., 94 – 102/ <https://doi.org/10.30837/rt.2024.1.216.09>

4. Лазебний В.С., Ін Ченлян, Омелянець О.О. Дослідження реальної пропускної спроможності безпроводової інформаційної мережі специфікації IEEE 802.11 n // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки, № 5 Part 1, Vol. 29 (68), pp. 155-160, 2018 – URL: <https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/archive?id=38>

5. О.О Омелянець. Оцінювання експлуатаційних характеристик мережі IEEE 802.11 ас з каналом 20МГц/Омелянець О.О., Лазебний В.С. //V International Scientific and Practical Conference «RICERCHE SCIENTIFICHE E METODI DELLA LORO REALIZZAZIONE: ESPERIENZA MONDIALE E REALTÀ DOMESTICHE» "ΛΟΓΟΣ", с.221-230/ <https://doi.org/10.36074/logos-26.04.2024.046>

6. О.О Омелянець. Особливості застосування безпроводних мереж IEEE 802.11 ас для передавання голосового трафіка /Омелянець О.О., Лазебний В.С. //VI International Scientific and Theoretical Conference «Theoretical and practical scientific achievements: research and results of their implementation», Болонья, Італія, 26 квітня 2024, Collection of scientific papers "SCIENTIA", с.100-107/ <https://doi.org/10.36074/scientia-26.04.2024>

7. Ін Ченлян. Дослідження особливостей розповсюдження інформаційних відеопотоків мережами стандарту 802.11 / Ін Ченлян, Омелянець О. О., Лазебний В. С. // Електронна та Акустична Інженерія : науково-технічний журнал. – 2019. – Т. 2, № 2. – С. 30–35. – Бібліогр.: 14 назв. – URI: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/33664> DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-0965.2019.2.2.163110>

8. Електронна та Акустична Інженерія, 2(1), 43–49, 2019 – Аналіз показників успішності передавання звукових потоків засобами безпроводової мережі стандарту 802.11, Інъ Ченлянь, Лазебний В.С., Омелянець О.О., <https://doi.org/10.20535/2617-0965.2019.2.1.163109>, <http://feltran.kpi.ua/article/view/163109>

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку джерел посилання і додатків. Повний обсяг роботи складає 162 сторінки, 45 рисунків, список використаних джерел із 76 найменувань на 9 сторінках, 2 додатки на 10 сторінках.

1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖ IEEE802.11AC НА ФІЗИЧНОМУ І КАНАЛЬНОМУ РІВНЯХ

1.1 Загальна характеристика технічних особливостей специфікації IEEE 802.11 ac

Технологія безпроводових мереж IEEE 802.11 ac є результатом еволюційного розвитку технології IEEE 802.11 n. Значного збільшення розрахункової пропускної здатності мереж стандарту IEEE 802.11 ac досягнуто внаслідок удосконалення механізмів доступу до безпроводового каналу і передавання інформаційних потоків, розширення діапазону системних параметрів. Зокрема для збільшення пропускної здатності безпроводового каналу мережі IEEE 802.11 ac передбачено можливість використовувати канали з шириною частотної смуги 20, 40, 80 і 160 МГц, а також застосовувати для носійних частот OFDM сигналу модуляцію більшої кратності (QAM-256) порівняно з найбільшою кратністю модуляції, застосованої в технології IEEE 802.11 n (QAM-64). Крім того збільшено кількість просторових потоків для більш гнучкої реалізації технології багатопотокового передавання даних (MIMO), а також спрощено порівняно зі специфікацією IEEE 802.11 n механізм доступу до каналу в режимі дуже швидкого передавання даних (VHT). Специфікацією IEEE 802.11 ac передбачено завжди активувати режим агрегування кадрів, навіть в тому разі, коли нема черги на передавання і передавання відбувається по одному кадру по мірі надходження, а також передбачено завжди використовувати режим пріоритизації кадрів відповідно до їх вмісту [3].

1.2 Особливості організації доступу до середовища передавання в мережах стандарту IEEE 802.11ac

Частотні смуги можливих радіоканалів мереж IEEE 802.11ac в неліцензованому діапазоні 5 ГГц наведено на рис.1.1 [2, 4].

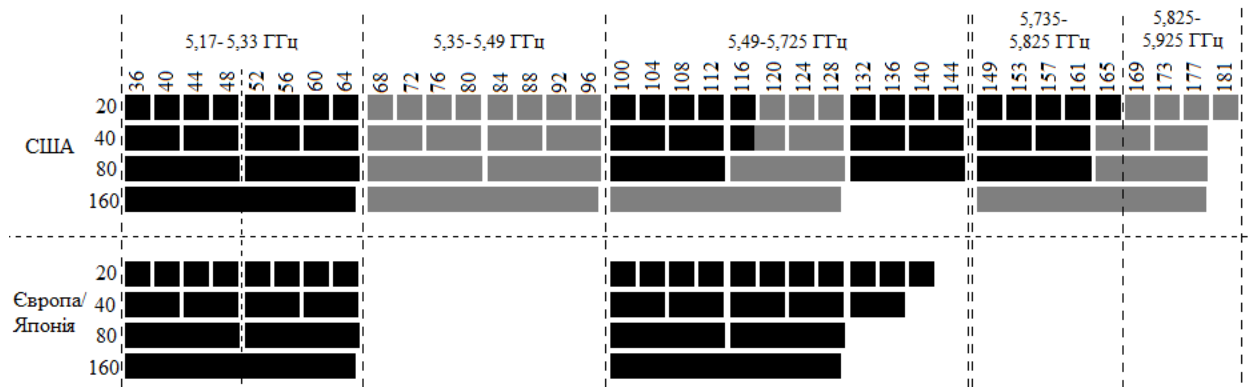


Рисунок 1.1 – Розподіл частотних смуг неліцензованого діапазону 5 ГГц

Більш світлими смужками позначені частотні канали, які введено додатково для потреб мереж IEEE 802.11ac в США.

У верхній частині діаграми, рис.1.1, наведено нумерацію каналів завширшки 20 МГц згідно з розбивкою неліцензованого діапазону 5 ГГц на частотні смуги по 5 МГц і відповідної їх нумерації, наведеної в Регламенті електрозв'язку МСЕ. Згідно з виділеним частотним ресурсом для організації мереж IEEE 802.11ac в діапазоні 5 ГГц в Україні і інших європейських країнах можна організувати 19 каналів з частотною смугою 20 МГц, 9 каналів з частотною смугою 40 МГц, 4 канали з частотною смугою 80 МГц і 2 канали з частотною смугою 160 МГц. Станції мережі IEEE 802.11ac мають обов'язково підтримувати смуги 20, 40 та 80, а смугу 160 ГГц, як додаткову можливість [2, 4].

Щоб краще використовувати доступний частотний ресурс в специфікації 802.11ac введено розподіл каналів на первинні і вторинні або, іншими словами, на основні і неосновні. Основний канал – це канал, який призначено точці доступу для постійного використання, а неосновний канал точка доступу може використовувати для збільшення пропускної здатності в разі, якщо частотна смуга неосновного каналу вільна. На рис. 1.2 наведено приклад призначення основних і неосновних каналів з різною шириною частотної смуги. На рисунку проілюстровано концепцію найнижчих восьми доступних каналів. Для

організації доступу до каналу в технології мереж 802.11 завжди застосовують процедуру оцінювання чи вільний канал. Важливим компонентом стандарту 802.11ac є спосіб, із застосуванням якого точка доступу може динамічно перемикає пропускну здатність каналу для кожного окремого кадру. Коли доступним є широкий канал, точка доступу може автоматично збільшити ширину частотної смуги і тим самим застосувати більші швидкості передавання даних. Якщо доступний лише основний канал з вузькою частотною смугою каналу, тоді точка доступу IEEE 802.11ac повертається до роботи тільки в межах частотної смуги цього каналу. Для визначення можливості використовувати частотні смуги, як основного, так і неосновного каналів передбачено застосовувати удосконалену процедуру оцінювання чи вільний канал (CCA – Clear-Channel Assessment).

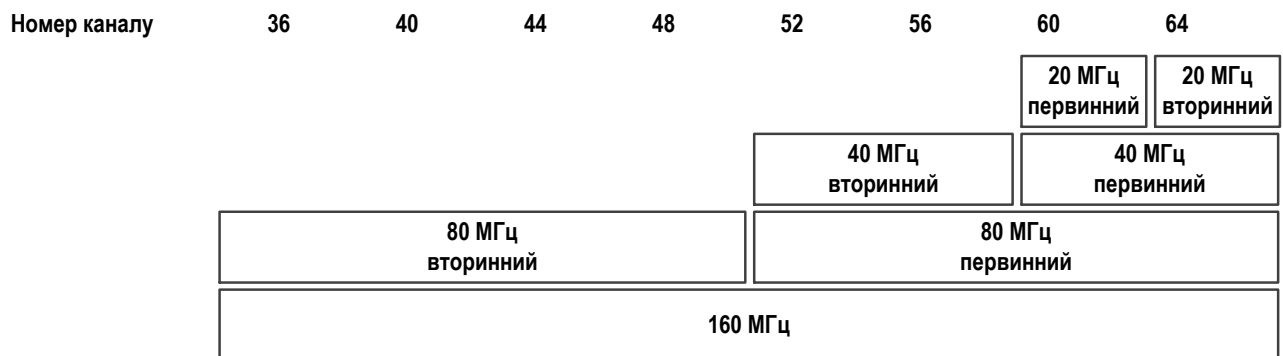


Рисунок 1.2 – Приклад розподілу частотних смуг основних і неосновних каналів [2, 5]

На практиці станція IEEE 802.11ac може узгоджувати використання частотного спектру з суміжними мережами набагато ефективніше, ніж станція IEEE 802.11n, оскільки виявлення активного мережного обладнання IEEE 802.11ac на неосновних каналах реалізовано значно краще.

Ефективність рішення щодо застосування поняття первинних і вторинних каналів полягає в тому, що це надає можливість кільком мережам спільно використовувати той самий частотний простір. Через велику різноманітність пристроїв і вимоги стосовно швидкості передавання даних, мережа, яку розроблено для забезпечення максимальної швидкості з використанням каналів 160 МГц, не завжди потребуватиме повної пропускну здатності каналу. Дві

мережі з максимальними частотними смугами можуть спільно використовувати один канал 160 МГц. Вони обидві можуть передавати кадри в частотних смугах 80 МГц одночасно, якщо згідно з налаштуванням їхні основні канали 80 МГц різні.

Можливість спільного використання більш широких каналів залежить від здатності пристрою IEEE 802.11ac виявляти процес передавання не лише на своєму основному каналі, але й на будь-яких вторинних використовуваних каналах. В мережах 802.11n можливості оцінювання вільного каналу (ССА – clear channel assessment) в неосновних смугах частот були обмежені, тому розгортання двох мереж IEEE 802.11n з перекриттям зон обслуговування на практиці вимагало, щоб основні канали були однаковими [6]. В обладнанні мереж IEEE 802.11ac передбачено удосконалену технологію оцінювання зайнятості (ССА) неосновного каналу, тому дві мережі можуть функціонувати паралельно з використанням основних частотних смуг і за нагоди використовувати частотну смугу неосновного каналу, що призводить до збільшення пропускної здатності. Удосконалений механізм ССА застосований у специфікації дозволяє реалізовувати кілька сценаріїв для розгортання мереж IEEE 802.11ac.

Для визначення точкою доступу чи вільний канал передбачено використовувати одночасно два методи оцінювання рівня електромагнітного випромінювання в каналі: виявлення сигналу Wi-Fi і визначення рівня радіочастотної енергії в каналі. Згідно з першим методом, приймач починає декодувати сигнал, що надходить від інших мереж IEEE 802.11, а згідно з другим – приймач оцінює рівень радіочастотного сигналу довільного походження в частотній смузі каналу.

Порогові значення рівнів сигналів, що визначають зайнятість каналу, наведено в табл.1.1 [2].

У разі щільного розгортання безпроводових мереж на обмеженій території треба враховувати можливий взаємний вплив сигналів суміжних частотних смуг.

Таблиця 1.1 – Порогові значення рівня потужності для виявлення вільного каналу

Ширина каналу, МГц	Сигнальний поріг, дБм (основний канал)	Сигнальний поріг, дБм (неосновний канал)	Енергетичний поріг, дБм
20	-82	-72	-62
40	-79	-72	-59
80	-76	-69	-56
160	-73	не визначено	не визначено

Цей вплив визначається рівнем сигналів, сформованих з урахуванням частотної маски, рис. 1.3.

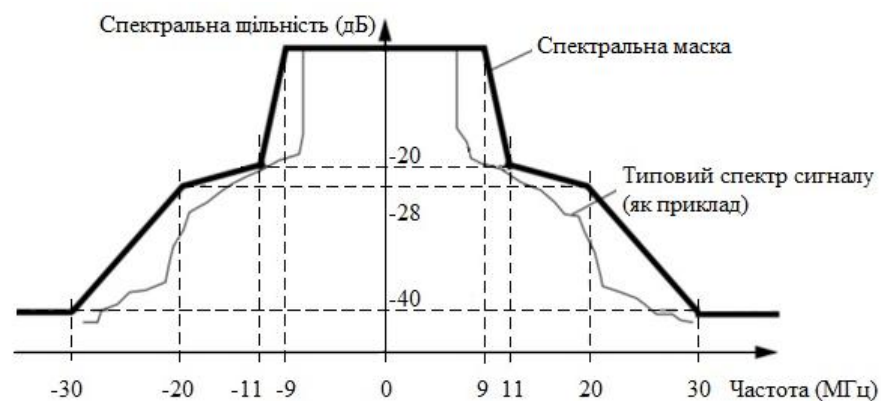


Рисунок 1.3 – Спектральна маска для каналу з частотною смугою 20 МГц мережі IEEE 802.11 [7]

Спектральна маска розподілу позасмугового випромінювання однакова для частотних каналів 20, 40, 80 і 160 МГц.

1.3 Розподіл часу в режимі конкурентного доступу в мережах за специфікацією IEEE 802.11ac

Основне правило доступу до каналу залишається незмінним і полягає в тому, що кадр може бути переданий, якщо середовище передавання вільне. Чи є можливість скористатись середовищем, залежить від того, наскільки широкий канал передбачено для передавання. Якщо в частотній смузі робочого каналу

виявлено рівень електромагнітної енергії, що перевищує пороговий рівень зайнятості, пристрій здійснює процедуру відтермінування, щоб отримати доступ до каналу після його звільнення.

Послідовність часових інтервалів, передбачених для режиму конкурентного доступу, наведено на рис. 1.4. Специфікацією передбачено реалізовувати традиційний режим доступу RTS/CTS і обов'язкову реалізацію пріоритизації трафіку. Після звільнення частотного каналу станція, що готова до передавання кадрів даних відраховує міжкадровий арбітражний інтервал AIFS, відраховує інтервал очікування конкурентного вікна *CW*, обумовлений лічильником зворотного відліку, і передає кадр *RTS*, що містить інформацію про тривалість передавання і деяку іншу системну інформацію. У відповідь на запит станція, до якої заплановано передавання, надсилає кадр *CTS*. Згідно зі схемою, наведеною на рис. 1.4 між кадрами переданими в одному циклі доступу до каналу застосовано короткі міжкадрові інтервали *SIFS*, що унеможливорює спроби інших станцій даної мережі скористатись каналом для передавання своїх даних. За такої схеми доступу колізія (одночасне передавання кадрів кількома станціями) можлива тільки під час передавання кадрів *RTS*.

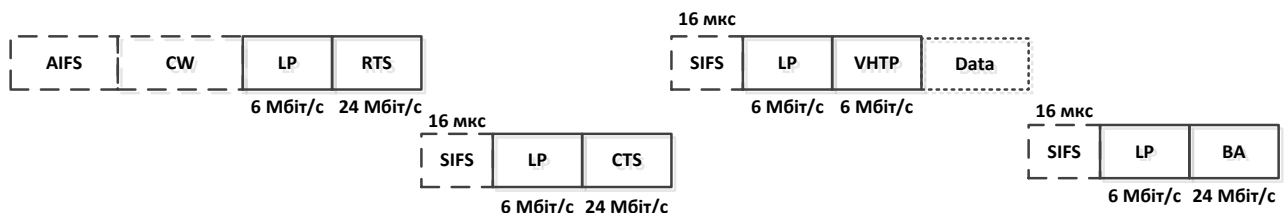


Рисунок 1.4 – Схема розподілу часу в режимі конкурентного доступу

На схемі розподілу часу [3] зроблено такі позначення: *AIFS* – міжкадровий арбітражний інтервал; *CW* – інтервал, сформований лічильником зворотного відліку; *LP* – успадкована преамбула; *RTS* – вміст кадру повідомлення про доступ до каналу для передавання; *SIFS* – короткий міжкадровий інтервал, 16 мкс [2, 8]; *CTS* – вміст кадру відповіді від станції-адресата про можливість передавання; *VHTP* – преамбула дуже швидкісного режиму передавання (для передавання між станціями IEEE 802.11ac); *Data* –

блок користувацьких даних разом з інформацією протоколів високих рівнів моделі OSI); *BA* – блоковий кадр-відповідь про прийнятий кадр даних в мережах з широким частотним каналом (40, 80, 160 МГц) або *ACK* – в мережі з частотною смугою 20 МГц.

Зазначимо, що тривалість міжкадрового арбітражного інтервалу *AIFS* і тривалість інтервалу відрахованого лічильником зворотного відліку залежить від типу даних і, відповідно, наданого пріоритету. Дані для розрахунку згаданих інтервалів наведено в табл. 1.2 [9].

Таблиця 1.2 – Системні параметри для різних класів корисного навантаження

Параметри EDCA за початковим налаштуванням для кожного класу доступу			
Клас доступу	CW_{min}	CW_{max}	$AIFSN$
Фоновий (AC_BK)	15	1023	7
Краща спроба (AC_BE)	15	1023	3
Відео (AC_VI)	7	15	2
Голос (AC_VO)	3	7	2
Успадкований DCF	15	1023	2
* $AIFSN$ – число (N) для визначення тривалості арбітражного інтервалу ($AIFS$).			

Тривалість інтервалу *AIFS* визначають за формулою [9, 10]:

$$AIFS[AC_XX] = SIFS + AIFSN \cdot ST, \quad (1.1)$$

де ST (slot time) – тривалість часового слоту, $ST = 9$ мкс, XX – тип пріоритизованого трафіка, табл.1.2 .

Тривалості міжкадрових інтервалів, протягом яких станції мережі не здійснюють дій для доступу до каналу, мають такі значення: $SIFS = 16$ мкс (короткий міжкадровий інтервал), $DIFS$ (успадкований DCF) = 34 мкс, $AIFS[AC_BE] = SIFS + 3 \cdot ST = 16 + 3 \cdot 9 = 43$ мкс, $AIFS[AC_VO] = SIFS + 2 \cdot ST = 16 + 2 \cdot 9 = 34$ мкс, $AIFS[AC_BK] = SIFS + 7 \cdot ST = 16 + 7 \cdot 9 = 79$ мкс.

У разі виникнення колізії станції здійснюють повторну спробу передати

кадри даних і завантажують в лічильник зворотного відліку число із множини конкурентного вікна, збільшуваного за двійковим показниковим законом згідно зі співвідношенням [11]

$$CW := 2(CW + 1) - 1, \quad (1.2)$$

де CW – числове значення конкурентного вікна, що визначає множину чисел, із яких станція випадковим чином вибирає число для завантаження в лічильник зворотного відліку.

У разі передавання пріоритизованого трафіку першою отримає доступ до каналу станція, яка застосовує менший конкурентний міжкадровий інтервал *AIFS* і має коротший інтервал затримки CW , обумовлений лічильником зворотного відліку.

Стандартом передбачено можливість використовувати крім першої спроби іще шість повторних спроб ($R = 6$) передати кадр даних у разі виникнення кількох колізій поспіль. Проте виробники мережного обладнання часто використовують свої оригінальні алгоритми подолання колізії і повторного передавання кадрів в разі їх втрати. Наприклад, деякі виробники налаштовують обладнання так, щоб після третьої невдалої спроби передати кадр станція автоматично переходила на більш завадостійкий режим модуляції і кодування (MCS з меншим індексом).

Після кожного успішного передавання станція повертається в стан початкового налаштування і завантажує лічильник зворотного відліку числом із множини, обмеженої CW_{\min} .

1.4 Особливості радіоканалу мережі IEEE 802.11ac

У мережах IEEE 802.11, починаючи зі специфікації IEEE 802.11a, для передавання інформаційних потоків застосовують систему багаточастотної модуляції й кодування OFDM. Ширина базової частотної смуги радіоканалу становить 20 МГц. У специфікації IEEE 802.11n передбачено можливість

використовувати частотну смугу 40 МГц, а в специфікації 802.11ac передбачено додаткову можливість використовувати частотні смуги 80 МГц й 160 МГц (опційно) [2, 3]. Через обмеженість частотного ресурсу стандартом передбачено можливість створювати радіочастотний канал з частотною смугою 160 МГц об'єднанням двох суміжних смуг по 80 МГц або шляхом одночасного використання двох несуміжних смуг по 80 МГц.

Для формування угруповання ортогональних частот OFDM символів частоти носійних рознесені на 312,5 кГц. Кількість носійних частот пропорційна ширині частотної смуги відповідного каналу. Певну частину носійних частот (пілотні носійні) використовують для оцінювання передавальної характеристики каналу. Загальну кількість носійних частот для радіоканалів з різними частотними смугами і кількість пілотних носійних наведено в табл. 1.3 [2].

Таблиця 1.3 – Характеристика носійних частот радіочастотних каналів

Ширина частотного каналу, МГц	Загальна кількість носійних частот	Кількість сигнальних носійних	Кількість пілотних носійних	Відносна частка пілотних носійних, %	Відносне збільшення пропускної здатності каналу
20	56	52	4	7	1
40	114	108	6	5	2,1
80	242	234	8	3	4,5
160	484	468	16	3	9,0

Символ OFDM складається з корисного інтервалу тривалістю 3,2 мкс і захисного інтервалу. Передбачено можливість використовувати звичайний захисний інтервал тривалістю 0,8 мкс і короткий захисний інтервал тривалістю 0,4 мкс в режимі дуже швидкого передавання (VHT). Тривалість символу OFDM становитиме відповідно 4 мкс або 3,6 мкс.

На відміну від специфікації IEEE 802.11n в специфікації IEEE 802.11ac передбачено меншу кількість режимів модуляції і кодування (MCS) для носійних частот OFDM символу. Усього передбачено десять режимів (0, 1, 2, ..., 9), табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Параметри сигналів OFDM мережі IEEE802.11ac (VHT_MCS)

HT MCS	VHT MCS	Модуляція	Код.	20 МГц				40 МГц				80 МГц				160 МГц			
				S, Мб/с		Min.	RSSI	S, Мб/с		Min.	RSSI	S, Мб/с		Min.	RSSI	S, Мб/с		Min.	RSSI
				800нс	400нс			800нс	400нс			800нс	400нс			800нс	400нс		
Один просторовий потік																			
0	0	BPSK	1/2	6,5	7,2	2	-82	13,5	15	5	-79	29,3	32,5	8	-76	58,5	65	11	-73
1	1	QPSK	1/2	13	14,4	5	-79	27	30	8	-76	58,5	65	11	-73	117	130	14	-70
2	2	QPSK	3/4	19,5	21,7	9	-77	40,5	45	12	-74	87,8	97,5	15	-71	175,5	195	18	-68
3	3	16-QAM	1/2	26	28,9	11	-74	54	60	14	-71	117	130	17	-68	234	260	20	-65
4	4	16-QAM	3/4	39	43,3	15	-70	81	90	18	-67	175,5	195	21	-64	351	390	24	-61
5	5	64-QAM	2/3	52	57,8	18	-66	108	120	21	-63	234	260	24	-60	468	520	27	-57
6	6	64-QAM	3/4	58,5	65	20	-65	121,5	135	23	-62	263,3	292,5	26	-59	526,5	585	29	-56
7	7	64-QAM	5/6	65	72,2	25	-64	135	150	28	-61	292,5	325	31	-58	585	650	34	-55
-	8	256-QAM	3/4	78	86,7	29	-59	162	180	32	-56	351	390	35	-53	702	780	38	-50
-	9	256-QAM	5/6	-	-	31	-57	180	200	34	-54	390	433,3	37	-51	780	866,7	40	-48
Два просторових потоки																			
8	0	BPSK	1/2	13	14,4	2	-82	27	30	5	-79	58,5	65	8	-76	117	130	11	-73
9	1	QPSK	1/2	26	28,9	5	-79	54	60	8	-76	117	130	11	-73	234	260	14	-70
10	2	QPSK	3/4	39	43,3	9	-77	81	90	12	-74	175,5	195	15	-71	351	390	18	-68
11	3	16-QAM	1/2	52	57,8	11	-74	108	120	14	-71	234	260	17	-68	468	520	20	-65
12	4	16-QAM	3/4	78	86,7	15	-70	162	180	18	-67	351	390	21	-64	702	780	24	-61
13	5	64-QAM	2/3	104	115,6	18	-66	216	240	21	-63	468	520	24	-60	936	1040	27	-57
14	6	64-QAM	3/4	117	130,3	20	-65	243	270	23	-62	526,5	585	26	-59	1053	1170	29	-56
15	7	64-QAM	5/6	130	144,4	25	-64	270	300	28	-61	585	650	31	-58	1170	1300	34	-55
-	8	256-QAM	3/4	156	173,3	29	-59	324	360	32	-56	702	780	35	-53	1404	1560	38	-50
-	9	256-QAM	5/6	-	-	31	-57	360	400	34	-54	780	866,7	37	-51	1560	1733	40	-48
Три просторових потоки																			
16	0	BPSK	1/2	19,5	21,7	2	-82	40,5	45	5	-79	87,8	97,5	8	-76	175,5	195	11	-73
17	1	QPSK	1/2	39	43,3	5	-79	81	90	8	-76	175,5	195	11	-73	351	390	14	-70
18	2	QPSK	3/4	58,5	65	9	-77	121,5	135	12	-74	263,3	292,5	15	-71	526,5	585	18	-68
19	3	16-QAM	1/2	78	86,7	11	-74	162	180	14	-71	351	390	17	-68	702	780	20	-65
20	4	16-QAM	3/4	117	130	15	-70	243	270	18	-67	526,5	585	21	-64	1053	1170	24	-61
21	5	64-QAM	2/3	156	173,3	18	-66	324	360	21	-63	702	780	24	-60	1404	1560	27	-57
22	6	64-QAM	3/4	175,5	195	20	-65	364,5	405	23	-62	-	-	26	-59	1580	1755	29	-56
23	7	64-QAM	5/6	195	216,7	25	-64	405	450	28	-61	877,5	975	31	-58	1755	1950	34	-55
-	8	256-QAM	3/4	234	260	29	-59	486	540	32	-56	1053	1170	35	-53	2106	2340	38	-50
-	9	256-QAM	5/6	260	288,9	31	-57	540	600	34	-54	1170	1300	37	-51	-	-	40	-48

Примітка. HT MCS – швидкісний режим за специфікацією IEEE 802.11n; VHT MCS – дуже швидкісний режим за специфікацією IEEE 802.11ac; S – швидкість передавання блоку даних; SNR – відношення сигнал/шум; RSSI (Received Signal Strength Indication) – мінімальне значення потужності на вході приймача.

Параметри цих режимів наведено в табл.1.4 [12]. Крім режимів модуляції і кодування в цій таблиці наведено мінімальні значення рівнів сигналів і відношення сигнал/шум на вході приймача абонентської станції безпроводової мережі для трьох сценаріїв функціонування мережі: з одним, двома і трьома просторовими потоками.

У першому стовпчику табл.1.4 наведено нумерацію режимів модуляції й кодування (MCS) для мереж специфікації IEEE 802.11n (HT_MCS), у другому – для мереж специфікації IEEE 802.11ac (VHT_MCS).

Хоча стандартом IEEE 802.11ac передбачено можливість використовувати до восьми просторових потоків, проте, до окремого користувача залежно від кількості приймальних антен в абонентському пристрої точка доступу може спрямовувати один, два або три потоки. Мобільні телефони мають зазвичай одну антену, ноутбуки мають одну або дві антени, адаптери Wi-Fi мають дві антени, а деякі спеціальні користувацькі пристрої можуть мати до чотирьох антен.

Важливим системним параметром безпроводової мережі, що значно впливає на її експлуатаційні характеристики є випромінювана потужність передавача мережної станції. Максимальну потужність випромінювання радіоелектронних засобів (РЕЗ) безпроводових мереж стандарту IEEE802.11 в частотній смузі 5150 – 5850 МГц в Україні регламентовано постановою Кабінету Міністрів України № 801 від 15 липня 2022 р. Зокрема в ній визначено, що «експлуатація радіообладнання стандартів IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac і IEEE 802.11ax здійснюється виключно всередині приміщень відповідно до Б01 за умови використання в РЕЗ інтегрованих (конструктивних) неспрямованих антен із коефіцієнтом підсилення до 9 дБі та обмеження максимальної еквівалентної ізотропної випромінювальної потужності до 100 мВт» [13].

1.5 Структура кадру

Для визначення пропускної здатності безпроводової мережі і інших експлуатаційних показників важливо знати структуру кадру і тривалість окремих

частин кадру. У специфікації IEEE 802.11ac передбачено спрощену порівняно з IEEE 802.11n структуру кадру і в той же час забезпечено сумісність з попередніми специфікаціями стандарту IEEE 802.11. Преамбула службових кадрів має структуру кадрів попередніх специфікацій. Структура кадру даних містить преамбулу кадрів попередніх специфікацій і преамбулу суто 802.11ac, рис.1.5 [14].

Заголовок кадру даних 802.11ac містить дві преамбули: преамбулу кадрів специфікації 802.11a і преамбулу дуже швидкісного режиму передавання (VHT), яку сприймають тільки станції 802.11ac.

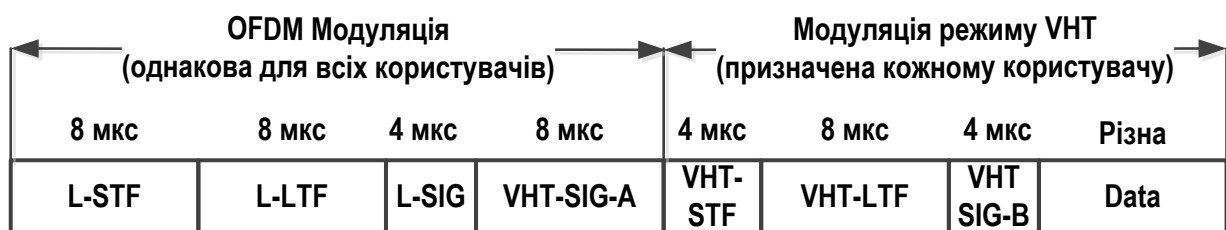


Рисунок 1.5 – Формат кадру фізичного рівня швидкісного режиму (VHT)

Преамбула попередніх специфікацій складається із полів L-STF, L-LTF, L-SIG і завжди має тривалість 20 мкс. Цю преамбулу завжди передають із застосуванням найбільш завадостійкої модуляції і кодування (MCS0) зі швидкістю 6,5 Мбіт/с. В преамбулі є два тренувальні поля: коротке тренувальне поле (L-STF) і довге тренувальне поле (L-LTF). Поле (L-SIG) використовується стандартом 802.11a для опису швидкості передавання даних і довжини кадру у байтах.

Преамбула режиму VHT може бути різної тривалості залежно від кількості просторових потоків. Вона містить поле сигналізації, розподілене на дві частини VHT A (VHT-SIG-A) і B (VHT-SIG-B). Разом ці два поля описують атрибути кадру, такі як ширина каналу, модуляція та кодування, а також те, чи є кадр однокористувацьким чи багатокористувацьким. Також преамбула VHT містить два тренувальні поля VHT-STF (коротке тренувальне поле) й VHT-LTF (довге

тренувальне поле). Тривалість поля VHT-LTF залежить від кількості використовуваних просторових потоків. Найменша тривалість 24 мкс, рис.1.5.

Поле даних (Data) містить пакет протоколу вищого рівня або, можливо, сукупний (агрегований) кадр, що містить кілька пакетів вищого рівня. Формат поля даних наведено на рис.1.6. Оскільки поле даних знаходиться після заголовка, його передають з максимально можливою швидкістю, описаною заголовком фізичного рівня. Усі дані передають у форматі агрегованого кадру A-MPDU. Навіть один кадр, передають у такому форматі [2].

Роздільники блоків даних з окремими пакетами вищого рівня мають розмір 4 байти. Станція автоматично формує сукупний кадр в разі накопичення кількох пакетів в буфері даних. Стандартом визначено максимальну тривалість передачі, що становить 5,484 мілісекунди.

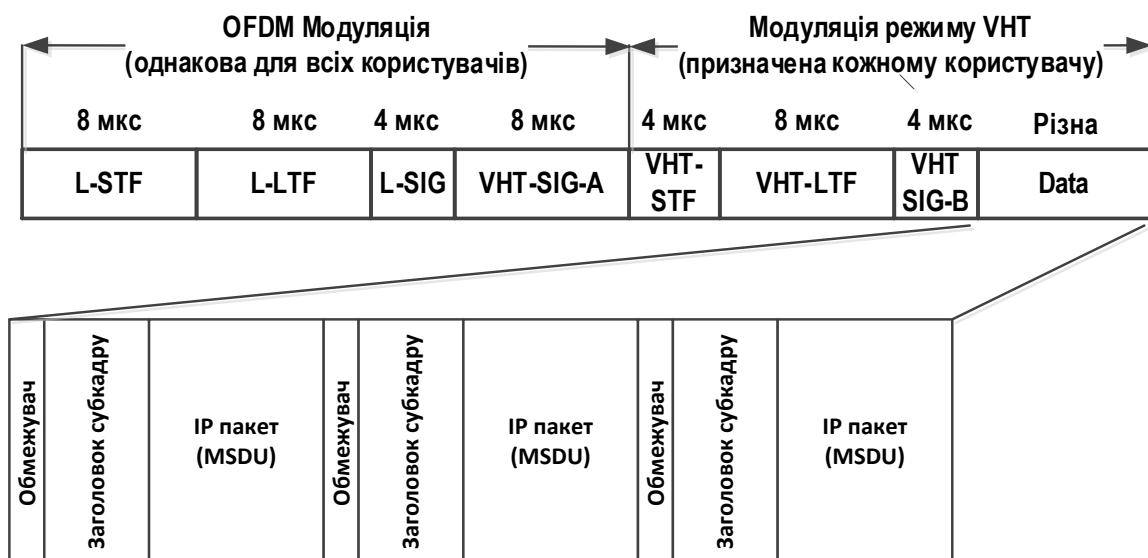


Рисунок 1.6 – Структура блоку даних в агрегованому форматі

Максимальне значення MSDU становить 2304 байтів, максимальний розмір A-MPDU становить 11454 байтів.

1.6 Зона обслуговування

Безпроводові мережі IEEE 802.11ac в Україні призначено використовувати в межах приміщень і споруд. Стандартом передбачено можливість налаштування

всіх основних системних параметрів: робочої частоти каналу, ширини частотної смуги, параметрів модуляції і протизавадного коду, максимальної величини корисного навантаження кадру даних, кількості просторових потоків. Проте в спеціальній технічній літературі відсутня інформація про зв'язок розмірів зони обслуговування і зазначених системних параметрів.

1.7 Особливості технічної реалізації безпроводової електронної системи передавання даних

Електронна система передавання даних може об'єднувати різну кількість пристроїв, які здійснюють обмін даними в межах локалізованого сегменту або обмінюються даними із зовнішніми інформаційними пристроями і системами.

Приклад безпроводової системи обміну даними наведений на рис. 1.7 [11].

Електронна система передавання даних у вигляді локалізованого сегменту утворює локальну мережу передавання даних. Наведена локальна безпроводова мережа є мережею, що функціонує за стандартом 802.11.

В мережі на рис. 1.7 наведено точку доступу і різні типи абонентських пристроїв. Мережу, в якій абонентські пристрої здійснюють обмін через точку доступу називають інфраструктурною.

В наведеному на рис.1.7 сегменті локальної мережі функціонують два ноут-буки, два планшети, два смартфони, персональний комп'ютер, мережний принтер і мультимедійний термінал. Дані від зовнішніх джерел надходять до точки доступу через маршрутизатор.

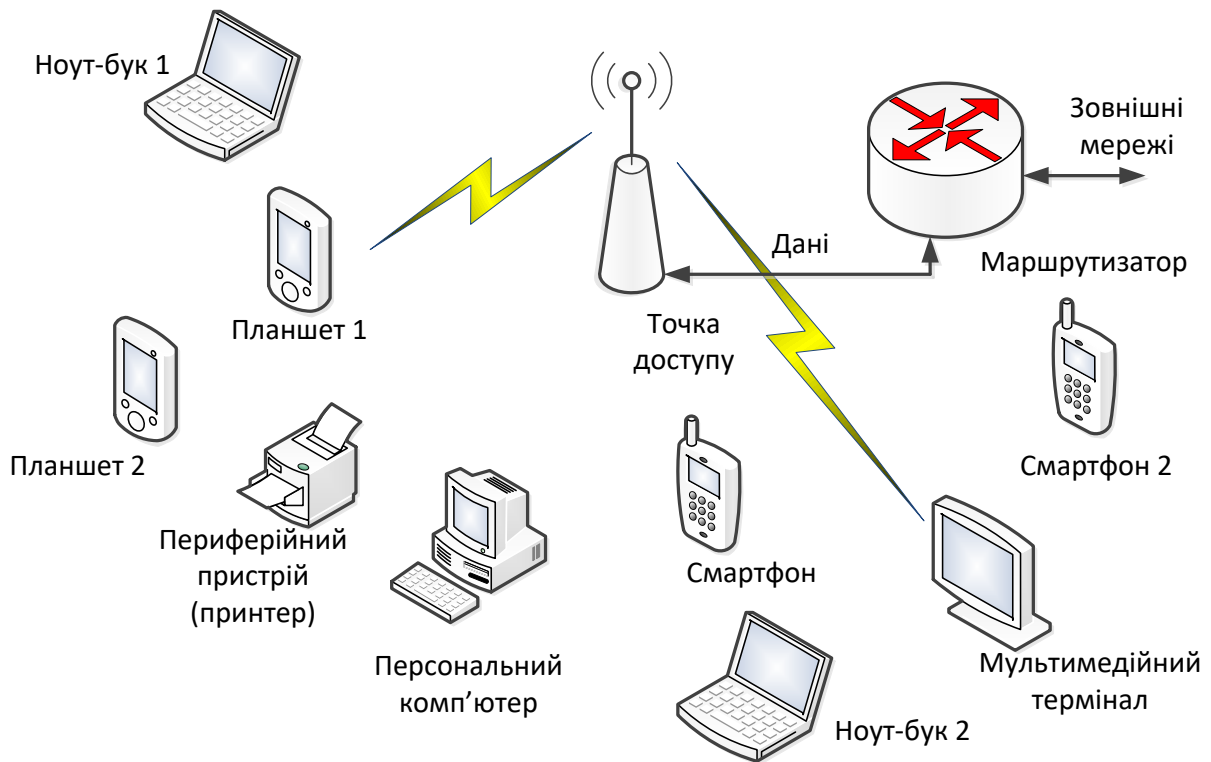


Рисунок 1.7 – Схема локального сегменту електронної системи передавання даних

Залежно від реалізованої технології передавання даних точка доступу передає дані одному абоненту в разі використання одного просторового потоку, як це наведено на рис. 1.7, або кільком абонентам, якщо технологією передбачено багатокористувацький режим з кількома просторовими потоками (MU-MIMO).

Кожен пристрій системи передавання даних має електронний модуль, що забезпечує оброблення даних і їх передавання через спільне телекомунікаційне середовище.

З метою зменшити масо-габаритні показники і енергоспоживання апаратних засобів системи передавання даних функціональні модулі такої системи виготовляють з використанням високоінтегрованих електронних компонентів. У таких компонентах реалізовано концепцію «система на кристалі» (SoC – system-on-crystal). Внаслідок необхідності здійснювати складні математичні обчислення і фізичні перетворення інтегровані електронні

компоненти мають складну структуру. Приклад такого модуля наведено на рис. 1.8.

На рис. 1.8 наведено такі складники модуля 88W8997-BD1 [15]:

- Схема керування вхідними інтерфейсами (паралельним (PCI), послідовними (SDIO, USB, UART), спеціальним (PCM));
- процесор даних Wi-Fi
- контролер каналних сигналів Wi-Fi 5, Wave 2, (802.11ac)
- контролер радіочастотних сигналів Wi-Fi 5, Wave 2, (802.11ac)
- модуль підсилювачів передавача (PA – power amplifire) і приймача (LNA – low noise amplifire);
- двонапрямний перемикач (SVDT)
- дуплексер, трінапрямний перемикач SP3T
- одноразово програмована пам'ять (OTP)
- логічний інтерфейс співіснування стандартів мобільного безпроводового зв'язку (Mobile Wireless Standards (MWS) coexistence logical interface [16]);
- регулятор напруги живлення (Power regulator).

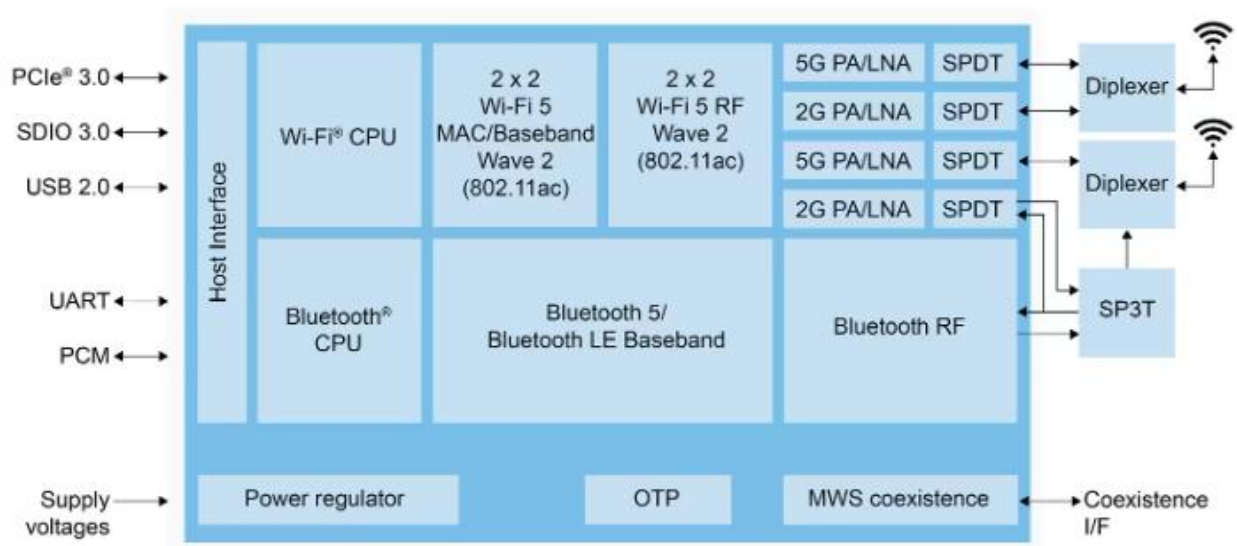


Рисунок 1.8 – Структура модуля 88W8997-BD1 для реалізації технології передавання даних IEEE802.11ac [15]

Модуль 88W8997 – перше в галузі комбіноване рішення реалізоване за 28 нм технологією виготовлення мікросхем. Модуль є результатом співпраці виробників мережних електронних компонентів і забезпечує такі режими:

- удосконалена безпроводова технологія (wave 2) передавання даних п'ятого покоління (IEEE802.11ac) з двома просторовими потоками (2x2);
- багатокористувацький режим (MU-MIMO);
- передавання даних в межах малого радіусу дії за технологією Bluetooth 5.3.

Удосконалення топології та 28-нм техпроцес з низьким енергоспоживанням зменшують енергоспоживання до 40% порівняно з попередніми технічними рішеннями. 88W8997 має найвищий рівень інтеграції на ринку. Він містить дводіапазонні підсилювачі потужності (PA), підсилювачі з низьким рівнем шуму (LNA) і перемикачі, що знижує рівень міжсистемних завад до мінімуму його монтаж передбачено робити за технологією «кристал на платі» (CoB – Chip-on-Board).

На рис. 1.2 наведено укрупнену структуру модуля 802.11ac, але окремі функціональні одиниці цього модуля мають складну структуру. Так процесор Wi-Fi має стільки ядер, скільки просторових потоків передбачено використовувати в електронній системі передавання даних. Зокрема в модулі 88W8997-BD1 процесор має два ядра, кожне із яких має забезпечити формування сигналу одного потоку на передачу в реальному часі, здійснення шифрування і протизавадного кодування, а також зворотні процедури для прийнятого сигналу.

Контролер каналних сигналів має два канали і призначений забезпечити формування OFDM сигналу в цифровому форматі. Серед виконуваних процедур багатоточкове перетворення Фур'є, яке має різні розміри залежно від ширини частотної смуги радіоканалу, а також цифро-аналогове (в режимі передавання) і аналого-цифрове (в режимі приймання) перетворення сигналів на проміжній частоті.

Модуль підсилювачів (два канали на передавання і два на приймання)

забезпечує підсилення потужності радіочастотних сигналів в режимі передавання (велика потужність, до 21,7 дБм) і підсилення прийнятих сигналів підсилювачем з малим коефіцієнтом шуму (малий рівень сигналів, від -82 дБм і менше).

Із наведеного прикладу структури електронної системи передавання даних випливає, що розширення діапазону системних параметрів (ширина частотної смуги, кратність модуляції) призводить до необхідності збільшувати обчислювальні потужності апаратних засобів.

Зі збільшення кількості просторових потоків схема модуля Wi-Fi іще більше ускладнюється оскільки для формування кожного потоку треба мати поний набір обчислювальних засобів і засобів перетворення сигналів.

Ретельне дослідження впливу технологічних параметрів на експлуатаційні характеристики електронної безпроводової системи передавання даних дозволить не тільки забезпечити високу ефективність мережі передавання даних на етапі проектування та експлуатації, а й дозволить визначити доцільний рівень обмеження вимог до електронних апаратних засобів.

1.8 Огляд результатів досліджень експлуатаційних характеристик мереж IEEE 802.11ac

Натепер накопичено значний досвід використання безпроводових електронних систем передавання даних за технологією IEEE 802.11ac. Експлуатаційні показники наявних мереж не завжди є відповідними прогнозованим, внаслідок чого виникають проблеми із забезпеченням якісних показників послуг з передавання інформаційних потоків. Дослідженню функціональних можливостей зазначених електронних систем і аналізу наявного досвіду їх експлуатації з метою поліпшити якісні показники присвячено багато науково-технічних робіт. Огляд частини із них наведено нижче.

Дослідженню функціональних можливостей та моделюванню процесів у безпроводових мережах IEEE 802.11n/ac присвячено, наприклад, роботи [17-21].

Роботи спрямовані на дослідження впливу окремих удосконалень на експлуатаційні характеристики та параметри якості обслуговування. Зокрема, в роботі [17] досліджено процеси передавання даних у змішаній мережі з обладнанням різних поколінь і основну увагу приділено впливу низькошвидкісних станцій на швидкість передавання даних високошвидкісними станціями. В роботі зроблено ґрунтовний аналіз, але не враховано. Роботу [18] присвячено дослідженню впливу функцій агрегування та багатопотокового передавання даних (MIMO) на пропускну здатність мережі IEEE 802.11ac, на величину затримки передавання пакету та на величину нерівномірності цієї затримки (джитер). У цій роботі також не враховується процес виникнення колізій, а використовуються досить сумнівні сценарії функціонування мережі з дуже великою кількістю активних станцій на одну точку доступу (200, 400, 600 активних станцій). Враховуючи алгоритм доступу до каналу, застосований в мережах IEEE 802.11ac така кількість активних станцій призведе до безперервних колізій, що унеможливить функціонування мережі. В [19] наведено параметри системи тестування характеристик мережі із застосуванням обладнання компанії Роде і Шварц, а також приклад спектральної характеристики у висхідному радіочастотному каналі мережі IEEE 802.11ac. У [20] наведено результати дослідження робочих характеристик мережі IEEE 802.11ac всередині приміщення засобами комп'ютерного моделювання. Наведені в [20] результати викликають сумнів оскільки у процесі моделювання отримано дуже великі значення пропускну здатності каналу (від 124 Мб/с до 479 Мб/с). Крім того дослідження зроблено для кожної станції окремо без урахування впливу інших станцій на процес функціонування мережі. Вплив різних типів шифрування (WEP, WPA, WPA2) на пропускну здатність локальної мережі IEEE 802.11ac досліджено в [21]. Досліджено мережу, в якій інформаційний потік із сервера передається на пристрій відтворення зображення через точку доступу. У цій роботі не зазначено, який режим мережі досліджено (яка ширина смуги частот, кількість просторових потоків, MCS, обсяг даних в одному кадрі). В роботі досліджено мережу з точкою доступу і однією станцією. В дослідках

використані пакети з обсягом даних від 128 байтів до 1048 байтів без агрегування кадрів. Зроблено дослідження із застосуванням мережних протоколів IPv4 та IPv6, а також транспортних протоколів TCP та UDP. Отримана пропускна здатність залежить від всіх перерахованих чинників і має найбільші значення від 240 до 280 Мб/с в разі застосування WPA2.

В роботі [22] наведено цікаві дані стосовно застосування агрегування в одно-, дво- і трипотоківому режимі. Зокрема наведено дані, що в каналі з частотною смугою 20 МГц і одним просторовим потоком насичення каналу відбувається, коли десять активних станцій передають дані з інтенсивністю 3 Мб/с. Загальна пропускна здатність каналу становить 30 Мб/с, а непродуктивні витрати часу становлять 23%. В двопотоковому режимі насичення має місце за наявності 21 станції, що передають дані з інтенсивністю 3 Мб/с. Загальна пропускна здатність каналу становить 65 Мб/с, а непродуктивні витрати часу становлять 25%. В двопотоковому режимі насичення має місце за наявності 21 станції, що передають дані з інтенсивністю 3 Мб/с. Загальна пропускна здатність каналу становить 100 Мб/с, а непродуктивні витрати часу становлять 23%. Наведено результати досліджень і для каналів з більшою шириною частотних смуг (40 та 80 МГц). Поза увагою дослідника залишилось питання щодо відстані від точки доступу до абонентських станцій, а також потужність випромінювання точки доступу.

У роботі [23] досліджено залежність пропускної здатності мережі від режиму передавання (MCS) для частотних каналів з шириною частотної смуги 20, 40, 80, 160 МГц, а також наведено результати оцінювання затримки передавання і джитеру. У результаті моделювання із застосуванням NS3 для мережі з точкою доступу і однією станцією отримано для каналу з частотною смугою 20 МГц максимальну пропускну здатність 33 Мб/с, затримку передавання в межах 150-480 мкс (MCS0 – MCS0), джитер від 0,00018 до 0,00006 UI. Для каналу 160 МГц в однопотоківому режимі отримано пропускну здатність в межах від 30 Мб/с (MCS0) до 55 Мб/с (MCS9). Недоліком роботи є відсутність аналізу конкурентного доступу, а також обґрунтування методики

дослідження затримки передавання і нерівномірності затримки передавання (джитеру), оскільки із загальних фізичних міркувань ці величини мають бути більшими.

Дослідженню пропускної здатності мережі присвячено також роботи [24-30], в яких головну увагу присвячено впливу мережних станцій, що функціонують за специфікаціями попередніх поколінь, на роботу мережі в цілому і їх впливу на характеристики швидкісних станцій 802.11ac.

Пропозиції удосконалити технологію доступу до каналу без зміни функціоналу апаратних засобів, які ґрунтуються на додатковому керуванні шириною частотної смуги робочого каналу залежно від завантаженості наведено в [31, 32].

Окремі роботи присвячено дослідженню трафіку із агрегованих кадрів, наприклад [29, 33]. Отримані результати досліджень підтверджують очікування щодо збільшення пропускної здатності каналу, збільшення затримки передавання і нерівномірності затримки.

Мережі IEEE 802.11ac почали активно використовувати для реалізації технології IP-телефонії (VoIP) [34, 35], організації відеоконференцій [36] тощо. Для реалізації таких технологій важливими чинниками є малі затримки передавання, невелика нерівномірність затримок і достатня пропускна здатність. Деякі фахівці відомих компаній не рекомендують використовувати мережі Wi-Fi для організації офісних локальних мереж саме через нестабільний характер параметрів з'єднання [37]. Затримки та їх нерівномірність можуть сягати великих значень [38-40], що суттєво зменшує якість наданих послуг. Узагальнено можна окреслити два основних чинники, що впливають на поточні експлуатаційні показники мережі: внутрішньо мережна конкуренція між абонентами мережі та вплив електромагнітної обстановки, створеної близько розташованими безпроводовими мережами IEEE 802.11. Іще одним чинником є перешкоди, розташовані на шляху розповсюдження електромагнітної хвилі. Такими перешкодами можуть бути цегляні й бетонні стіни і перегородки, металеві та скляні двері, тіло людини тощо [41-43]. Деякі перешкоди можуть

притлумлювати сигнал на кілька десятків децибелів, чим значно скорочувати зону обслуговування.

У діапазоні 2,4 ГГц сигнали Wi-Fi мереж розповсюджуються на більшу відстань, ніж в діапазоні 5 ГГц, але наявність великої кількості джерел випромінювання і міжмережних завад спонукає розробників пропонувати користувачам надавати перевагу діапазону 5 ГГц [44], в якому можна організувати більше частотних каналів без перекриття частотних смуг. Проте, в діапазоні 5 ГГц ефективні характеристики мереж суттєво відрізняються від задекларованих [45].

Стандарт IEEE 802.11 призначено для організації безпроводових мереж на фізичному і каналному рівнях моделі OSI. Питанням щодо функціонування мереж IEEE 802.11 на каналному рівні присвячено багато досліджень, а питання функціонування мережі на фізичному рівні залишається здебільшого поза увагою фахівців. Водночас процеси, що мають місце на фізичному рівні, суттєво впливають на розміри зони обслуговування і експлуатаційні характеристики мережі в цілому, їх врахування може забезпечувати кращі експлуатаційні показники мережі в цілому.

Хоча в цілому кількість публікацій, присвячених функціонуванню мереж IEEE 802.11ac, досить велика, проте детальний аналіз процесів, пов'язаних з конкурентним доступом до каналу та вплив технологічних параметрів на експлуатаційні характеристики, потребує ретельного уточнення. Враховуючи велике зацікавлення користувачів до використання безпроводових мереж IEEE 802.11 і зокрема мереж за специфікацією IEEE 802.11ac, подальше дослідження процесів у цих мережах є актуальним завданням для забезпечення ефективного використання частотного ресурсу і забезпечення необхідних якісних показників під час передавання потоків даних.

Висновки до розділу

Специфікація IEEE 802.11ac є еволюційним розвитком низки попередніх специфікацій (a/n) стандарту IEEE 802.11, призначених для використання в неліцензованому діапазоні частот 5 ГГц.

Збільшення пропускної здатності системи передавання даних досягнуто застосуванням таких технологічних прийомів: можливості додаткового розширення ширини частотної смуги каналу до 80 МГц обов'язково і до 160 МГц опційно; збільшення кратності квадратурної амплітудної модуляції до 256-QAM; використання до восьми просторових потоків для передавання даних (MIMO), використання режиму багатокористувацького (до чотирьох абонентів) передавання даних (MU-MIMO). Режим агрегування кадрів є обов'язковим і постійно активований, навіть за умови звичайного покадрового передавання даних.

Важливою особливістю технологій IEEE 802.11 є зворотна сумісність. Тобто електронне обладнання, що працює за новими специфікаціями, сумісне з обладнанням попередніх версій, однак це призводить до зменшення пропускної здатності мережі через її адаптацію до пристроїв попередніх специфікацій.

Для доступу до каналу передбачено використовувати конкурентний режим з розподіленою функцією координації і пріоритизацією інформаційних потоків (EDCA), що призводить до виникнення колізій під час передавання кадрів, але забезпечує переваги для передавання мультимедійних даних.

Електронні модулі для забезпечення функціональних можливостей, передбачених стандартом мають складну структуру. В разі використання в мережі багатокористувацького режиму для формування, передавання і приймання сигналів кожного просторового потоку апаратні засоби мають містити окремий повнофункціональний канал Wi-Fi. Алгоритм оброблення сигналів багатокористувацького режиму набагато складніший порівняно з однокористувацьким режимом.

Дослідженню експлуатаційних характеристик мереж за специфікацією IEEE 802.11ac присвячено багато науково-технічних робіт, але низка питань потребує додаткових досліджень і уточнень.

Для досягнення мети дисертаційної роботи необхідно:

- дослідити експлуатаційні характеристики мережі в режимі конкурентного доступу залежно від застосованого режиму функціонування;
- проаналізувати параметри зони обслуговування точки доступу мережі стандарту IEEE 802.11ac, залежно від параметрів модуляції й кодування, а також взаємний вплив суміжних мереж стандарту IEEE 802.11 на стабільність їх функціонування;
- дослідити ефективність застосування технології формування променів та технології багатопотокового передавання даних (MIMO) за умови обмеженої випромінюваної потужності точки доступу;
- дослідити ефективність застосування пріоритизації трафіку в мережах зі змішаним трафіком;
- зробити експериментальну перевірку отриманих результатів.

2 ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ IEEE 802.11ac

Метою цього дослідження є оцінити продуктивності безпроводової мережі IEEE 802.11 ac у режимі найвищої швидкості передавання (MCS8) у частотному каналі 20 МГц, а також у мережах з розширеним частотним спектром, з одним просторовим потоком за умови, що мережа має значну кількість активних станцій з насиченим навантаженням. Для дослідження використано альтернативну модель процесу функціонування мереж IEEE 802.11, що ґрунтується на концепції віртуального конкурентного вікна.

2.1 Методологія дослідження

З появою стандарту IEEE802.11 виникла необхідність розробити математичну модель процесу передавання даних, в якому реалізовано технології передбачені зазначеним стандартом. Таку модель запропонував Джузеппе Б'янкі [46, 47]. Модель набула поширення і нею користується більшість дослідників. Основною концепцією цієї моделі є насичене навантаження кожної активної станції мережі, що обумовлює постійні спроби доступу до каналу для передавання чергового кадру даних, а базовим параметром є ймовірність доступу до часового слоту (τ) для передавання кадру даних. Запропонована модель була удосконалена відповідно до змін, які обумовлені еволюцією технології передавання даних в специфікаціях стандарту IEEE802.11 різних поколінь [48]. Основним недоліком методики є неоднозначність визначення основних параметрів, а саме ймовірності доступу до каналу для передавання кадру даних τ і ймовірності виникнення колізії під час передавання кадру даних p . В зазначеній моделі ці параметри визначають один через інший і вони не можуть бути визначені безпосередньо через визначальні системні параметри – величину конкурентного вікна CW і кількість активних станцій в мережі N . Зокрема співвідношення для визначення τ і p мають такий вигляд [47, 48]:

$$\tau = \frac{2 \cdot (1 - 2p)}{(1 - 2p) \cdot (CW_{\min} + 1) + p \cdot CW_{\min} \cdot (1 - (2p)^m)}, \quad (2.1)$$

$$p = 1 - (1 - \tau)^{N-1}, \quad (2.2)$$

де CW_{\min} – мінімальне значення конкурентного вікна;

m – кількість спроб передати кадр даних внаслідок виникнення колізій;

N – кількість активних станцій, що конкурують за доступ до середовища передавання.

Зазначена неоднозначність у визначенні основних параметрів моделі призводить до значних похибок під час прогнозування експлуатаційних характеристик, особливо для мереж з великою кількістю активних станцій, коли ймовірність колізії становить 0,5 і більше.

Для прикладу зробимо розрахунок доступу до каналу для випадків, коли ймовірність колізії становить $p = 0,4$ і $p = 0,6$. Для трафіку без пріоритизації $CW_{\min} = 15$, $m = 6$. Згідно зі співвідношенням (2.1) отримаємо $\tau = 0,052$ (для $p = 0,4$), $\tau = 0,02$ (для $p = 0,6$). Тобто, отримані значення ймовірності доступу до каналу τ є дуже малими і не відповідають процесам, що мають місце в реальних мережах.

Альтернативну методику для розрахунку експлуатаційних характеристик безпроводових мереж передавання даних запропоновано в роботі [49]. Запропонована методика ґрунтується на концепції віртуального конкурентного вікна.

Згідно з концепцією віртуального конкурентного вікна процес передавання кадрів даних в мережі, в якій кожна станція має насичене навантаження, відбувається як квазістаціонарний випадковий процес.

Віртуальне конкурентне вікно VCW – це стохастичний параметр безпроводової мережі Wi-Fi у режимі насиченого навантаження, який кількісно дорівнює усередненій кількості елементарних часових інтервалів (часових слотів), протягом яких лічильник зворотного відліку відраховує інтервал затримки після завершення передавання попереднього кадру до початку передавання наступного кадру даних [26].

Математична модель процесу передавання кадрів даних встановлює однозначний зв'язок між системними параметрами мережі і експлуатаційними характеристиками. Математична модель не має обмежень щодо діапазону значень системних параметрів. Діапазон можливих значень параметрів обмежений стандартом і практичним досвідом використання безпроводових мереж передавання даних.

Дослідження процесів у безпроводовій мережі 802.11ac згідно із завданнями дисертаційної роботи здійснено з використанням концепції віртуального конкурентного вікна [50].

Перший етап досліджень зроблено для сценарію роботи мережі, в якому використано частотний канал 20 МГц в діапазоні 5 ГГц, з одночасно активними N станціями з насиченим навантаженням, які передають блоки даних однакового розміру з обсягом корисного навантаження 512 або 1500 байтів. Під час дослідження були визначені такі параметри: пропускна здатність безпроводової мережі, середня затримка передавання кадрів даних, нерівномірність затримки залежно від кількості активних станцій з насиченим навантаженням у мережі та деякі пов'язані характеристики. У дослідженні розглянуто сценарії за участі від двох до шістнадцяти активних станцій у мережі. Обмеження максимальної кількості станцій викликано значним погіршенням якісних показників мережі, якщо кількість станцій з насиченим навантаженням перевищує значення мінімального конкурентного вікна CW_{min} . Мінімальне значення конкурентного вікна в разі застосування пріоритизації трафіка наведено в табл. 1.2.

2.2 Експлуатаційні характеристики мережі з каналом 20 МГц

2.2.1 Пропускна здатність безпроводового каналу за відсутності конкуренції

Спочатку визначимо пропускну здатність безпроводового каналу, коли в мережі є одна активна станція з насиченим навантаженням, яка тривалий час передає дані в бік точки доступу. Будемо вважати, що станція здійснює доступ

до каналу за загальними правилами і кожного разу після завершення передавання поточного кадру даних завантажує лічильник зворотного відліку випадковим числом із набору $[0, \dots, CW_{\min}]$ для формування затримки доступу, передбаченої стандартною процедурою. Вибір будь-якого числа із зазначеного діапазону однаково ймовірний, тому, якщо передається велика кількість кадрів, середня затримка CW обумовлена лічильником зворотного відліку становитиме $CW_{\min}/2$.

Для визначення пропускної здатності каналу будемо використовувати загальне співвідношення:

$$S = \frac{E[PL_1]}{E[T_{PL1}]}, \quad (2.3)$$

де $E[PL_1]$ – середнє корисне навантаження одного кадру (512 або 1500 байтів корисного навантаження);

$E[T_{PL1}]$ – середній час передавання одного кадру даних.

Для визначення $E[T_{PL1}]$ скористаємося очевидним співвідношенням (2.4), яке відповідає розподілу інтервалів часу в циклі доступу до каналу, рис. 1.4.

З урахуванням усередненої тривалості конкурентного вікна $CW = CW_{\min}/2 = 7,5\sigma$ до початку передавання кадру RTS формула для визначення часу передавання кадру даних однією станцією матиме вигляд:

$$E[T_{PL1}] = DIFS + CW_{\min} \cdot \frac{\sigma}{2} + T_{RST} + SIFS + T_{CST} + SIFS + T_{MPDU} + SIFS + T_{ACK} \quad (2.4)$$

Для коректного розрахунку необхідно визначити тривалість інтервалів, зображених на рис. 1.4. Замість арбітражного інтервалу $AIFS[BE]$ розглядаємо звичайний міжкадровий інтервал $DIFS = 34$ мкс. Тривалість часового слоту, що використовують для вимірювання інтервалу затримки, становить $\sigma = 9$ мкс. Також необхідно враховувати всю службову інформацію та дані користувача, які передають із застосуванням багаточастотної модуляції OFDM з тривалістю одного символу 4 мкс (або 3,6 мкс в разі застосування короткого захисного інтервалу). Тобто тривалість кожного кадру кратна 4 мкс.

Тривалість кадру *RTS* визначимо для швидкості передавання 24 Мбіт/с (найбільша передбачена у стандарті IEEE 802.11 швидкість для кадрів *RTS* і *CTS*). Стандартом передбачено передавати кадри *RTS* і *CTS* з високою надійністю. Можливі швидкості передавання блоку даних цих кадрів становлять 6, 12 і 24 Мбіт/с. Преамбулу цих кадрів завжди передають зі швидкістю 6 Мбіт/с, і тривалість преамбули становить 20 мкс, рис. 1.4. Блок даних *RTS* становить 20 байтів. Швидкість 24 Мбіт/с є успадкованою від 802.11a. В режимі передавання з такою швидкістю застосовують модуляцію носійних частот 16-QAM і згорткове кодування зі швидкістю $CR=1/2$. Кількість бітів блоку даних кадру *RTS* з урахуванням протизавадного кодування становитиме $20 \cdot 8 \cdot 2 = 320$. Один символ OFDM містить 52 носійні частоти, кожна з яких передає 4 біти даних. Одним символом можна передати 208 бітів. Для передавання блоку даних кадру *RTS* треба $320:208=1,54 \rightarrow 2$ символи. Таким чином, загальна тривалість кадру *RTS* становить $20 \text{ мкс} + 4 \text{ мкс} \cdot 2 = 28 \text{ мкс}$.

Аналогічно визначимо тривалість інтервалу передавання кадру *CTS*. Обсяг даних цього кадру становить 14 байтів або 112 бітів. З урахуванням завадозахисного кодування, блок даних для передавання становитиме 224 біти. Кількість символів становить $224:208 = 1,077 \rightarrow 2$ символи. Тобто тривалість кадру *CTS* становить також 28 мкс.

Тривалість кадру відповіді (BA або ACK) разом із преамбулою становитиме 32 мкс [50].

Окремо розрахуємо тривалість кадру даних, а саме: ту його частину, яку можна передати з найбільшою швидкістю (86,7 Мбіт/с), табл. 1.4. У високошвидкісному режимі (VHT) у мережі IEEE 802.11ac короткий захисний інтервал (0,4 мкс) використовується в символі OFDM для передавання блоку даних, і, як наслідок, тривалість символу становить 3,6 мкс, а не 4 мкс. Візьмемо до уваги, що в каналі з шириною частотної смуги 20 МГц стандартом передбачено використання групування з 56 носійних частот OFDM, з яких 52 носійні частоти призначені для передавання корисних даних, а чотири носійні – для пілот-сигналів, табл. 1.3. Визначимо тривалість інтервалу передавання

безпосередньо кадру даних. Тривалість преамбули кадру даних, рис. 1.4, у разі використання одного просторового потоку є мінімальною і становить 44 мкс [2]. Для подальших розрахунків необхідно визначити час передавання блоку даних (Data).

Наведемо розрахунок для випадку, коли блок даних містить 512 байтів. Ми припускаємо, що на транспортному рівні використовується протокол UDP. Під час розрахунку розглянуто найбільш загальний випадок, коли до пакету даних на рівні мережі додається 8 байтів відповідно до протоколу доступу до підмережі SNAP, а на рівні MAC – 8 байтів службової інформації UDP. Тоді через канал потрібно буде передати 528 байтів або 4224 біти. Для передавання ми будемо використовувати найшвидший режим MCS 8, передбачений для каналу 20 МГц: QAM-256 (вісім біт на одне носійне коливання), $CR=3/4$ (швидкість згорткового коду). Окремо можна відзначити, що максимально швидкісну схему модуляції і кодування MCS 9 для каналу 20 МГц стандартом не передбачено. З урахуванням завадозахисного кодування один кадр даних міститиме $4224 \cdot 4/3 = 5632$ (біт). Один символ OFDM може передавати $8 \cdot 52 = 416$ (біт). Таким чином, для передавання всього блоку, що містить 512 байтів корисних даних, необхідно буде використовувати $5632:416 = 13,54 \rightarrow 14$ (символів). Тривалість інтервалу передавання блоку даних становитиме $3,6 \text{ мкс} \cdot 14 = 50,4 \text{ мкс}$. Якщо передаються блоки даних користувача розміром 1500 байтів, загальна кількість бітів буде $(1500+16) \cdot 8 \cdot 4/3 = 16171$. Щоб передати таку кількість бітів, потрібно $16171:416 = 38,87 \rightarrow 39$ (символів). Тривалість передавання цих символів становитиме 140,4 мкс.

З урахуванням тривалості преамбули блоку даних і інших часових інтервалів, рис. 1.4, тривалість циклу передавання кадру з 512 байтами даних користувача становитиме 331,9 мкс. У разі, коли блок даних користувача містить 1500 байтів, тривалість циклу передавання кадру буде 421,9 мкс.

Пропускна здатність каналу визначена за співвідношенням (2.3) становитиме $S_{1_512} = 512 \cdot 8:331,9 = 12,34$ (Мбіт/с), якщо в одному кадрі передається 512 байт інформації та $S_{1_1500} = 1500 \cdot 8:421,9 = 28,44$ (Мбіт/с), у разі

передавання 1500 байтів інформації.

Щоб визначити максимально можливу швидкість передавання між станцією і точкою доступу, зробимо розрахунок для сценарію, за якого станція безперервно передає кадри з максимально можливими блоками даних MSDU (11454 байтів) протягом певного інтервалу часу. Для передавання такого блоку даних буде потрібно 294 символів тривалістю 3,6 мкс. Час передавання блоку даних становитиме разом із преамбулою $44 + 1058,4 = 1102,4$ (мкс). З урахуванням контрольних кадрів та інтервалу очікування тривалість циклу передавання, рис. 1.4, найбільшого кадру даних становить 1339,9 мкс. У цьому сценарії пропускна здатність каналу становить $S_{1_11454} = 68,387$ Мбіт/с.

Для порівняння зазначимо, що швидкість передавання блоку даних у розглянутому нами режимі MCS 8 становить 86,7 Мбіт/с. Тобто ефективна пропускна здатність каналу в разі максимального завантаження кадру даних становить 78,88% від безпосередньої швидкості передавання даних.

Значення пропускної здатності каналу, отриманої вище для насиченого режиму з навантаженням кадрів 512 та 1500 байтів будемо використовувати як орієнтир для оцінювання впливу кількості активних станцій на якісні характеристики каналу.

2.2.2 Характеристики мережі в режимі конкурентного доступу

Тепер проаналізуємо пропускну здатність каналу та визначимо показники якості мережі за умови одночасної активності N станцій, що функціонують в насиченому режимі. Будемо вважати, що всі станції мають однакові технічні характеристики і передають свої пакети в режимі BE (best effort – найкраща спроба), тобто без пріоритизації.

У разі боротьби за доступ до каналу в конкурентному режимі будуть виникати колізії через одночасне передавання пакетів двома і більше станціями. Відповідно до специфікації IEEE 802.11a с мінімальне та максимальне значення конкурентного вікна в режимі BE становлять, відповідно, $CW_{\min} = 15$, $CW_{\max} =$

1023 (табл.1.2). Значення CW_{\min} визначає початковий набір $[0,1,2,\dots, CW_{\min}]$, з якого активні станції мережі випадковим чином вибирають число для завантаження лічильника зворотного відліку, що формує інтервал конкурентного вікна. Якщо активна станція під час спроби передати кадр потрапить в колізію кілька разів поспіль, вона може зробити сім послідовних спроб отримати доступ до каналу і кожен раз буде випадковим чином вибирати число для зворотного відліку з подвоєного набору чисел за алгоритмом $CW: = 2(CW+1) - 1$.

Цей механізм конкурентного доступу, передбачений для розподіленої функції координації (DCF), є основним механізмом конкуренції в мережах IEEE 802.11. Описаний алгоритм є базовим, але не обов'язковим. Виробники можуть використовувати алгоритми, в яких кількість повторних спроб може бути іншою або формування множини чисел для повторного завантаження може бути здійснене за іншим законом. З логіки роботи мережі IEEE 802.11ac в режимі DCF випливає, що колізія може виникнути тільки під час передавання кадру *RTS*. Тривалість колізії в такому разі буде складатись із тривалості кадру *RTS* (28 мкс) і тривалості між кадрового інтервалу *AIFS_BE* (43мкс).

2.2.3 Експлуатаційні характеристики мережі IEEE 802.11ac з частотним каналом 20 МГц в режимі MCS8

Щоб знайти граничні значення експлуатаційних показників в мережі з великою кількістю активних станцій, ми спочатку визначаємо значення віртуального конкурентного вікна VCW для випадків, коли в мережі IEEE 802.11ac є від двох до шістнадцяти активних станцій з насиченим навантаженням.

Відповідно до концепції віртуального конкурентного вікна, процес функціонування каналу безпроводової мережі з насиченим навантаженням розглядають як квазістаціонарний процес.

Важливою характеристикою описаного вище режиму, що визначає всі подальші розрахунки, є ймовірність колізії p_c , в яку може потрапити станція, що отримала доступ до каналу передавання даних. У [49] обґрунтовано приблизне розрахункове співвідношення ймовірності колізій між двома станціями мережі:

$$p_c^{(R)} = 1 - (1 - p_{c1})^{N(R)-1}, \quad (2.5)$$

де $p_{c1} = 1/(CW_{\min} + 1) = 1/CW_1$ – ймовірність колізії даної станції з іншою станцією мережі; $N(R)$ – кількість активних станцій в мережі, які можуть конкурувати за доступ до каналу після закінчення поточного інтервалу часу з урахуванням колізій; R – кількість повторних спроб у разі колізій під час передавання кадру ($R_{\max} = 6$).

Під час подальших розрахунків будемо вважати $N(R) \approx N$, оскільки кількість активних станцій, які безпосередньо беруть участь у змаганні за доступ до каналу, змінюється незначно [26]. Зміна кількості станцій обумовлена механізмом подолання колізій, який полягає у збільшенні вдвічі конкурентного вікна CW після кожної послідовної колізії. Після кожного вдалого передавання кадру (незалежно від спроби) станція відновлює для застосування початкове значення конкурентного вікна CW_{\min} . Таким чином кількість станцій, що бере участь в конкуренції за канал протягом часу реалізації конкурентного вікна $N(R)$ буде дещо меншою від загальної кількості активних станцій в мережі N .

Величину віртуального конкурентного вікна можна визначити за формулою:

$$VCW = \frac{CW_1 \cdot (1 - p_c)}{2} \cdot \sum_{i=1}^{R+1} (2p_c)^{i-1} = \frac{CW_1 \cdot (1 - p_c) \cdot [(2p_c)^R - 1]}{2 \cdot (2p_c - 1)}. \quad (2.6)$$

Пропускнну здатність каналу в зазначеному вище режимі можна визначити співвідношенням:

$$S = \frac{N \cdot E[PL_1] \cdot P_s}{T_{VCW}} \quad (2.7)$$

де $P_s = 1 - p_c^{R+1}$ – ймовірність успішної передавання кадру даних.

Час реалізації віртуального конкурентного вікна визначаємо як:

$$T_{VCW} = N \cdot \bar{T}_{PL} + N_c \cdot \bar{T}_c + n_{id} \cdot \sigma, \quad (2.8)$$

де N_c – кількість колізій під час реалізації віртуального конкурентного вікна; \bar{T}_{PL} і \bar{T}_c – усереднені значення тривалості циклу передавання одного кадру даних і тривалість колізії відповідно; $n_{id} = VCW$ – кількість вільних часових слотів під час реалізації віртуального конкурентного вікна.

Кількість колізій, які виникнуть під час віртуального вікна можна визначити за формулою [26]:

$$N_c = p_c \cdot \frac{N}{2} \cdot \frac{1 - p_c^{R+1}}{1 - p_c}. \quad (2.9)$$

Результати розрахунків характеристик безпроводового каналу мережі IEEE 802.11ac зі смугою частот 20 МГц у режимі насиченого навантаження за схемою модуляції та кодування MCS8 наведені в табл. 2.1 [51].

Таблиця 2.1 – Характеристики безпроводового каналу IEEE 802.11ac 20 МГц

N	p_c	VCW	N_c	$T_{VCW}^{512}, \mu s$	$S_{512}, Mbps$	$T_{VCW}^{1500}, \mu s$	$S_{1500}, Mbps$
2	0,0625	8,036	0,067	605,255	13,535	785,254	30,563
4	0,1760	9,519	0,427	1169,764	14,006	1529,722	31,377
6	0,2758	11,772	1,142	1763,176	13,932	2302,24	31,260
8	0,3635	14,905	2,282	2390,852	13,674	3104,312	30,853
10	0,4406	18,779	3,925	3056,364	13,304	3930,445	30,308
12	0,5083	23,067	6,149	3761,613	12,841	4768,249	29,679
14	0,5679	27,367	9,023	4507,34	12,296	5600,975	28,989
16	0,6202	31,307	12,602	5293,491	11,676	6410,825	28,245

Графічні залежності $VCW = f_1(N)$ і $N_c = f_2(N)$ наведені на рис. 2.2 і рис. 2.3 відповідно [51].

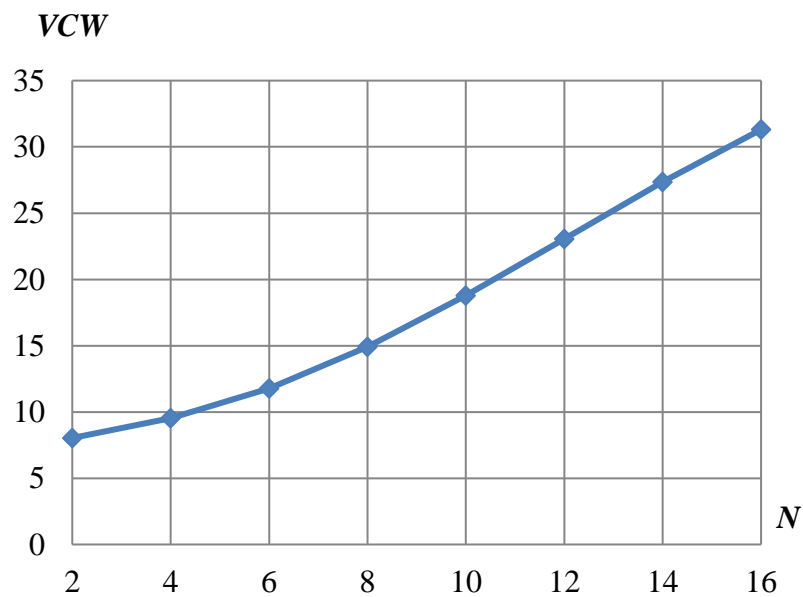


Рисунок 2.2 – Значення VCW в одиницях часових інтервалів (слотів) як залежність від кількості станцій N

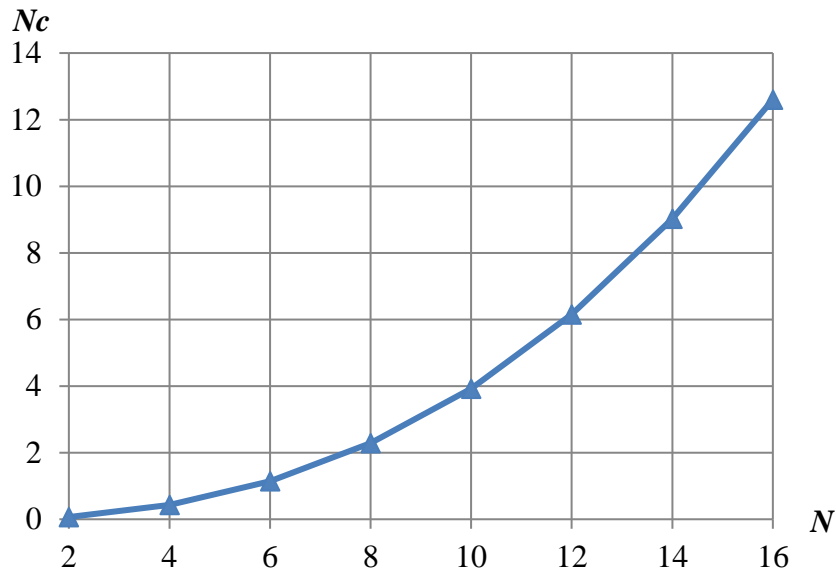


Рисунок 2.3 – Кількість колізій під час реалізації одного віртуального конкурентного вікна

Розрахункові графіки залежності пропускної здатності безпроводової мережі залежно від кількості активних станцій з насиченим навантаженням наведено на рис. 2.4, рис. 2.5 для кадрів даних з однаковим навантаженням: по 512 байтів або по 1500 байтів відповідно [51]. Лінії S_{1_512} і S_{1_1500} вказують пропускну здатність безпроводового каналу 802.11ac з однією активною станцією, що безперервно передає кадри з корисним навантаженням 512 байтів або 1500 байтів в кожному кадрі.

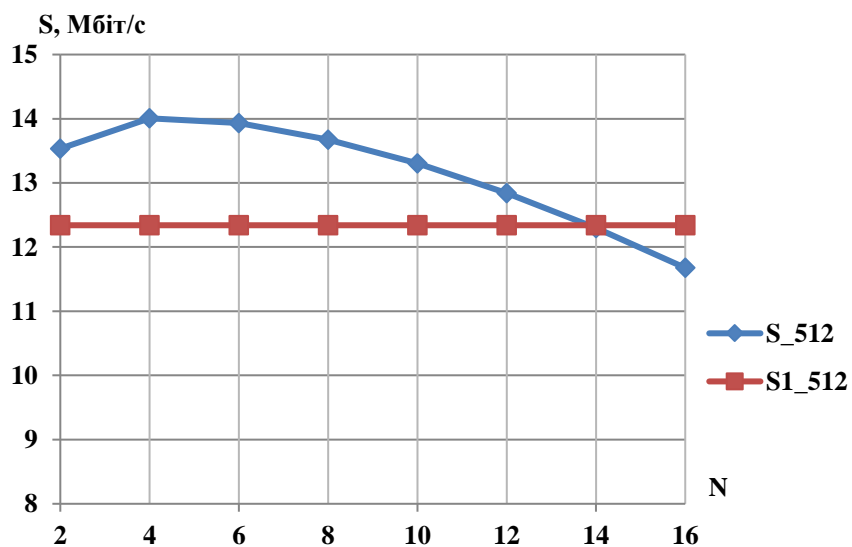


Рисунок 2.4 – Пропускна здатність каналу (S_{512}) у разі корисного навантаження кадру 512 байт

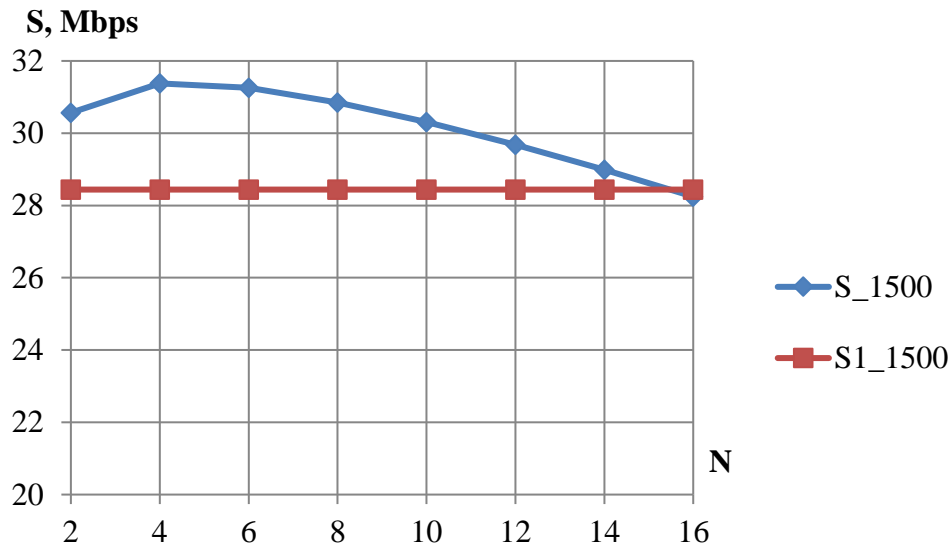


Рисунок 2.5 – Пропускна здатність каналу (S_1500) у разі корисного навантаження кадру 1500 байт

Середня затримка надходження кадрів даних дорівнюватиме часу реалізації віртуального конкурентного вікна (2.6). Числові значення цієї затримки, у разі рівномірного навантаження 512 байтів у кожному кадрі, наведено в табл. 2.1, а графічна залежність на рис. 2.6.

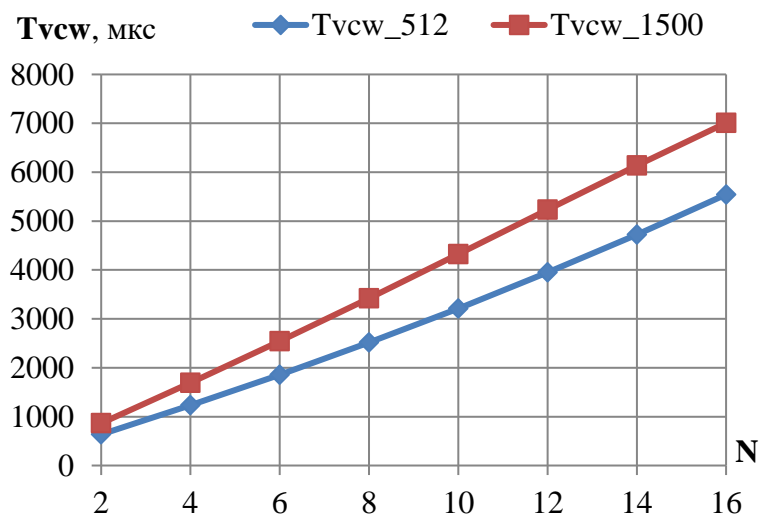


Рисунок 2.6 – Залежності затримки кадру, у разі рівномірного завантаження 512 або 1500 байтів

Наступним важливим параметром процесу передавання пакетизованої інформації є нерівномірність затримки (джитер). Для визначення нерівномірності затримки передавання скористаємося співвідношеннями, наведеними в [26]. Одним із можливих підходів до визначення джитера $\sigma(\tau)$ є

його визначення, як усередненої різниці між максимальною $\tau^{(\max)}$ і мінімальною затримкою $\tau^{(\min)}$. В такому разі джитер можна визначити, як подвоєне середньоквадратичне відхилення випадкової величини:

$$\sigma^{(\tau)} = \tau^{(\max)} - \tau^{(\min)} = 2\sqrt{D(\tau)}, \quad (2.10)$$

Дисперсію затримки $D(\tau)$ можна обчислювати, якщо скористатись значеннями відповідних параметрів, визначених для інтервалу віртуального конкурентного вікна для успішно переданих кадрів на кожному етапі доступу до каналу.

$$D(\tau) = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_{j=1}^{m+1} N_j \cdot (\tau_j^* - \bar{\tau})^2, \quad (2.11)$$

де $N^{(b)}$, N_j – загальна кількість переданих кадрів даних і кількість кадрів, переданих під час j -ї спроби під час реалізації віртуального конкурентного вікна; τ_j^* – максимальна затримка в разі успішного передавання кадру даних під час j -ї спроби доступу до безпроводового каналу, $\bar{\tau}$ – усереднена затримка.

$$\tau_j^* = (N \cdot P_s \cdot \bar{T}_{PL} + N_c \cdot \bar{T}_c) \cdot \frac{2^{j-1} \cdot (CW_{\min} + 1) - 1}{VCW} + \sigma \cdot 2^{j-1} \cdot ((CW_{\min} + 1) - 1). \quad (2.12)$$

Формула (2.10) дозволяє визначити максимальну затримку τ_j^* для кадру, який потрапить у $(j-1)$ колізію (на j -ій спробі кадр буде передано), а станція, яка його передає, завантажить у лічильник зворотного відліку максимальне число із множини чисел, отриманої в результаті застосування двійкового експоненціального закону для визначення величини конкурентного вікна.

Кількість кадрів, переданих на кожному етапі доступу до каналу в разі багаторазового потрапляння в колізію наведено в табл. А.7.

Графік залежності нерівномірності затримки від кількості активних станцій у мережі для випадку, коли кожна станція передає кадр даних із 512 байтами даних користувача, наведено на рис. 2.7.

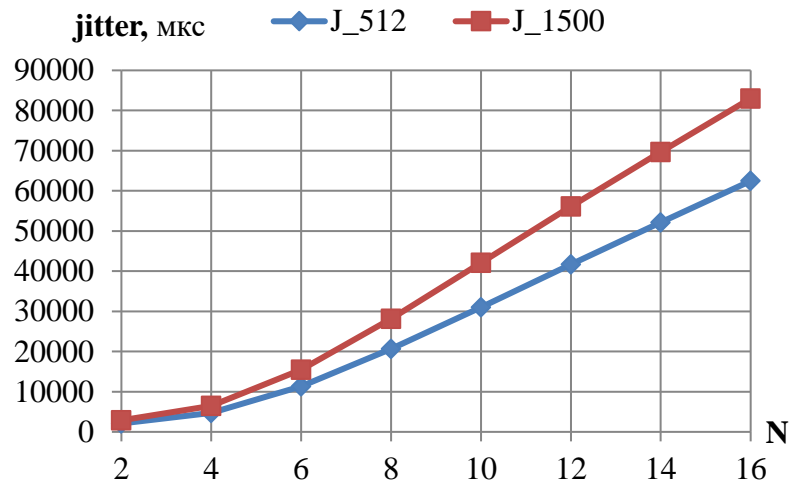


Рисунок 2.7 – Залежність джитера від кількості активних станцій для двох значень корисного навантаження в кадрах

У табл. 2.2 додатково наведено результати розрахунку кількості переданих кадрів і максимальної затримки на різних етапах доступу до каналу для кадрів, що кілька разів послідовно потрапили в колізію.

Таблиця 2.2 – Максимальної затримки часу передавання кадру на різних етапах доступу до каналу

N	2		8		12		14		16	
j	N_j	$\tau_{j, \mu s}^*$	N_j	$\tau_{j, \mu s}^*$	N_j	$\tau_{j, \mu s}^*$	N_j	$\tau_{j, \mu s}^*$	N_j	$\tau_{j, \mu s}^*$
1	1,875	720,02	5,092	1503,159	5,9004	1523,82	6,0494	1509,28	6,0768	1510,85
2	0,1171875	1488,04	1,850942	3106,51	2,999173	3149,24	3,435454	3119,18	3,768831	3122,44
3	0,0073242	3024,08	0,6728174	6313,23	1,524499	6400,06	1,950994	6338,98	2,337429	6345,60
4	0,0004579	6096,16	0,2445691	12726,67	0,774893	12901,72	1,10797	12778,58	1,449677	12791,93
5	2,861E-05	12240,33	0,0889009	25553,55	0,393878	25905,02	0,629216	25657,77	0,899088	25684,581
6	1,7881E-06	24528,66	0,0323155	51207,30	0,200208	51911,63	0,357332	51416,17	0,557614	51469,886
7	1,1176E-07	49105,32	0,0117467	102514,82	0,101766	103924,84	0,202929	102932,95	0,345832	103040,49
Σ	1,9999999		7,9932916		11,89479		13,7333		15,435268	

Примітка. j – етап доступу до каналу передавання даних

2.2.4 Аналіз отриманих результатів

Пропускна здатність мережі не є постійною величиною і залежить від кількості активних станцій і обсягу корисних даних в інформаційному кадрі.

Пропускна здатність каналу збільшується зі збільшенням обсягу корисних даних в інформаційному кадрі, що обумовлено зменшенням відносної частки непродуктивних витрат в циклі передавання кадру.

Зі збільшення кількості активних станцій, що функціонують в насиченому режимі пропускна здатність безпроводового каналу спочатку монотонно збільшується, а після досягнення певного максимуму – монотонно зменшується, рис. 2.6 та рис. 2.7. Така зміна пропускної здатності обумовлена двома явищами. Зростання пропускної здатності мережі зі збільшенням кількості активних станцій обумовлено зменшенням тривалості усередненого інтервалу очікування CW , тобто між передаванням кадрів різними станціями зменшується кількість «порожніх» часових слотів. Зменшення пропускної здатності обумовлено впливом колізій, наявність яких збільшує непродуктивні витрати часу [52].

Пропускна здатність безпроводового каналу з частотною смугою 20 МГц значно відрізняється від фізичної швидкості передавання корисних даних через значну втрату часу на обслуговування каналу (великі непродуктивні витрати). Чим менше блок даних, тим більше частка непродуктивних витрат в часовому циклі передавання блоку даних. Так, у разі корисного навантаження в кадрі даних обсягом 512 байтів максимальна розрахункова швидкість передавання корисного навантаження становить 14,006 Мбіт/с, рис.2.4, (чотири активні станції з насиченим навантаженням), що становить 16,15% від максимальної фізичної швидкості передавання даних, передбаченої для одного просторового каналу. У разі, коли корисне навантаження у кадрі даних становить 1500 байтів, максимальна пропускна здатність каналу становить 31,377 Мбіт/с, рис.2.5, що становить 36,19% від максимальної фізичної швидкості передавання даних.

Середня затримка передавання кадрів даних зростає зі збільшенням

кількості активних станцій у широкому діапазоні, що обумовлено збільшенням часового інтервалу, необхідного для передавання в середньому всіх кадрів активних станцій. Так, у разі передавання кожною станцією в середньому по одному кадру даних розміром 512 байт середня затримка з двома активними станціями в мережі становить 605 мкс, а з 16 активними станціями – 5293 мкс і лінійно зростає зі збільшенням кількості станцій, рис. 2.6. Коли корисне навантаження кадру становить 1500 байтів, середня затримка змінюється з 785 мкс для двох станцій до 6410 мкс для шістнадцяти станцій.

Залежно від кількості активних станцій у мережі нерівномірність затримки кадру змінюється в широкому діапазоні, рис. 2.7. Нерівномірність затримки у разі застосування двійкового показникового закону збільшення конкурентного вікна (CW) для станції, що потрапила в колізію, перевищує середню затримку приблизно в десять разів.

Зі збільшенням кількості активних станцій у мережі зростає ймовірність того, що не всі станції зможуть передати свої кадри з використанням семи (першої і шести повторних) наданих спроб, табл. 2.2. Залежно від типу кадрів і налаштування мережі такі кадри можуть бути відкинуті або будуть продовжені спроби передати ці кадри. За наявності в мережі восьми активних станцій з насиченим навантаженням не буде передано з використанням шести повторних спроб 0,084% всіх кадрів, за наявності дванадцяти станцій – 0,875%, за наявності чотирнадцяти станцій – 1,905%, за наявності шістнадцяти станцій – 3,53%, табл. 2.2.

2.3 Пропускна здатність мережі з розширеними частотними каналами

Метою даного дослідження є з'ясувати наскільки ефективним є застосування розширення частотної смуги радіоканалу безпроводової мережі IEEE 802.11ac для збільшення пропускної здатності в разі застосування різних систем модуляції і кодування (MCS).

Розрахунок пропускної здатності зроблено для файлів з корисним навантаженням даних 512 байтів і 1500 байтів. Розрахунок здійснено за методикою, застосованою вище для оцінювання пропускної здатності каналу з частотною смугою 20 МГц в режимі MCS8 з одним просторовим потоком.

Під час розрахунків окрім корисного навантаження кадру даних враховано також супутню інформацію: заголовок протоколу IP – 20 байтів, заголовок протоколу UDP – 8 байтів, заголовок протоколу SNAP – 12 байтів, а також контрольну суму (FCS) – 4 байти. Таким чином в кадрі канального рівня замість 512 байтів буде передано 556 байтів і замість 1500 байтів буде передано 1544 байти.

Розрахунок зроблено для режиму «краща спроба» (BE), який найбільш часто застосовують в мережах з пріоритизацією трафіку.

Тривалості часових інтервалів, рис.1.4, в циклі передавання кадру даних однією станцією мають такі значення: AIFS – 43 мкс, RTS – 28 мкс, SIFS – 16 мкс, CTS – 28 мкс, ACK – 32 мкс. Тривалість інтервалу передавання безпосередньо кадру даних визначено з урахуванням типу модуляції і швидкості кодування, наведених в табл. 1.4. Оскільки під час одночасного функціонування N станцій в насиченому режимі будуть виникати колізії розрахунок часу передавання кадрів здійснено із застосуванням співвідношення (2.6). Пропускную здатність каналу визначено за співвідношенням (2.5). Числові значення результатів розрахунків наведено в табл. А.1, А.2, А.3, А4, А.5, А.6.

При здійсненні дослідження враховано, що для каналу з частотною смугою 20 МГц не передбачено застосовувати режим модуляції і кодування MCS9.

Графіки залежності пропускної здатності каналу за різної ширини частотної смуги в разі корисного навантаження кадру 512 байтів і 1500 байтів для різних індексів модуляції і кодування (MCS) наведено на рис. 2.9 – 2.17.

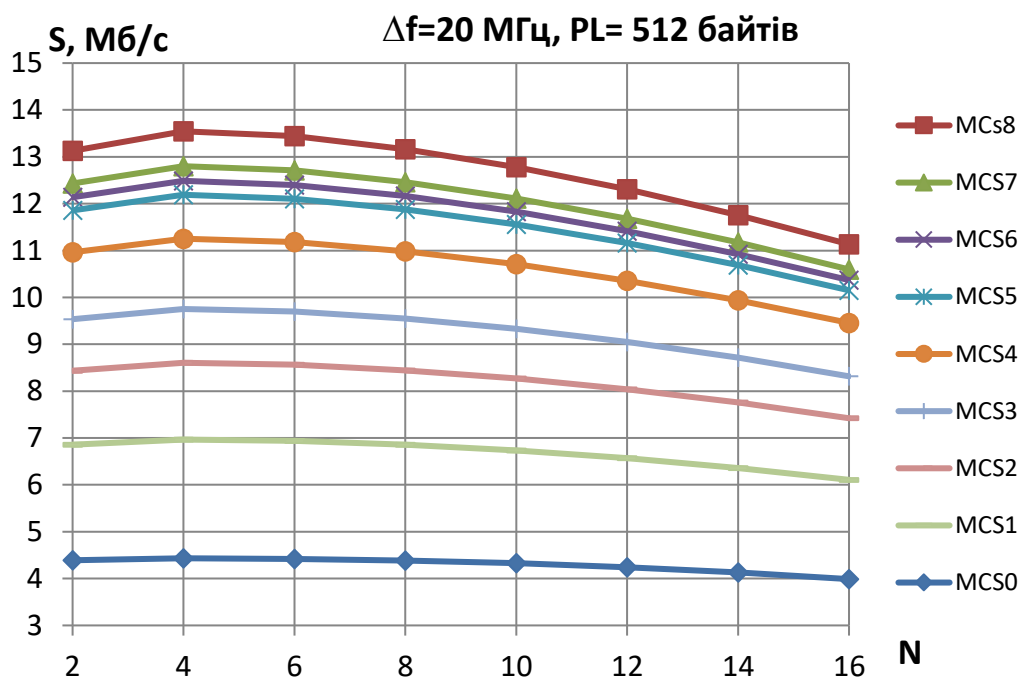


Рисунок 2.9 – Пропускна здатність мережі з частотною смугою 20 МГц в однопотоківому режимі PL=512 байтів

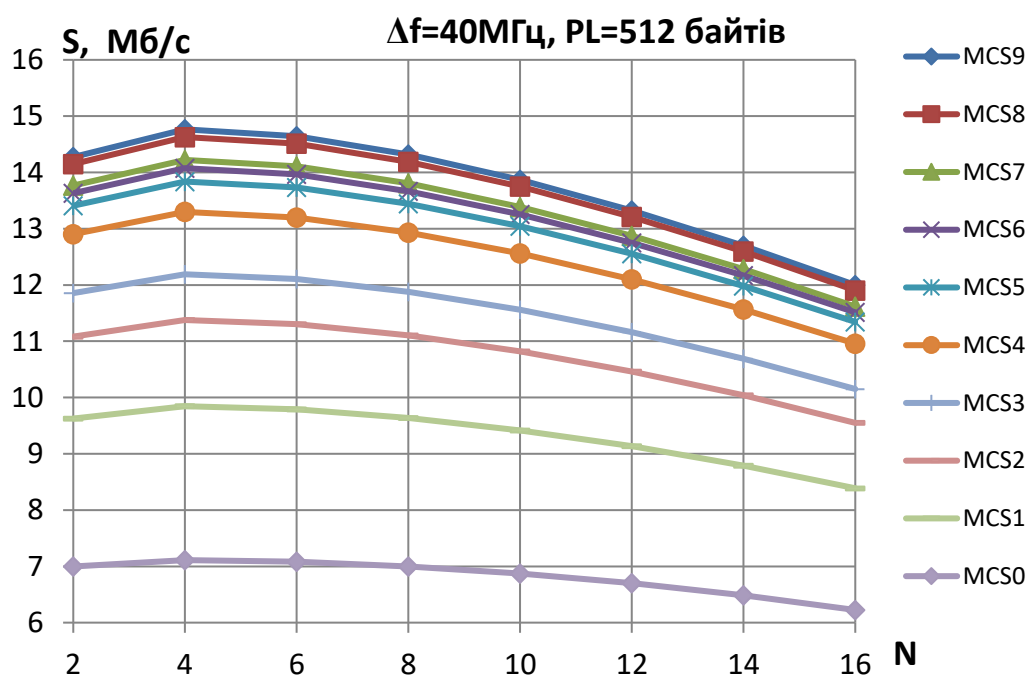


Рисунок 2.10 – Пропускна здатність мережі з частотною смугою 40 МГц в однопотоківому режимі PL=512 байтів

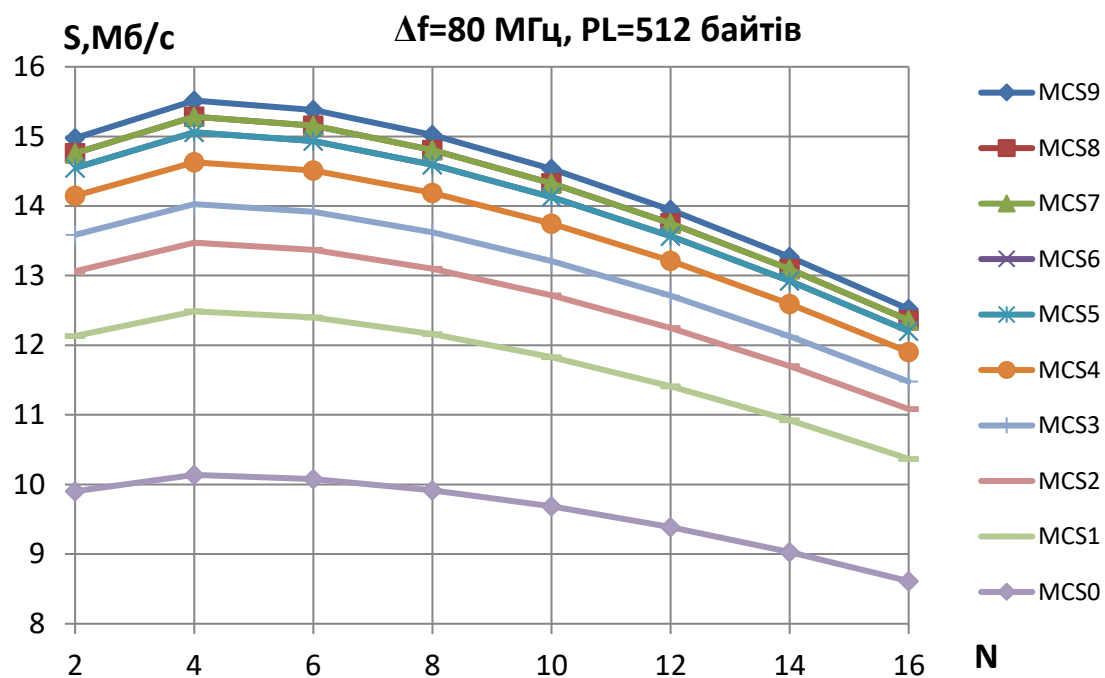


Рисунок 2.11 – Пропускна здатність мережі з частотною смугою 80 МГц в однопотоковому режимі PL=512 байтів

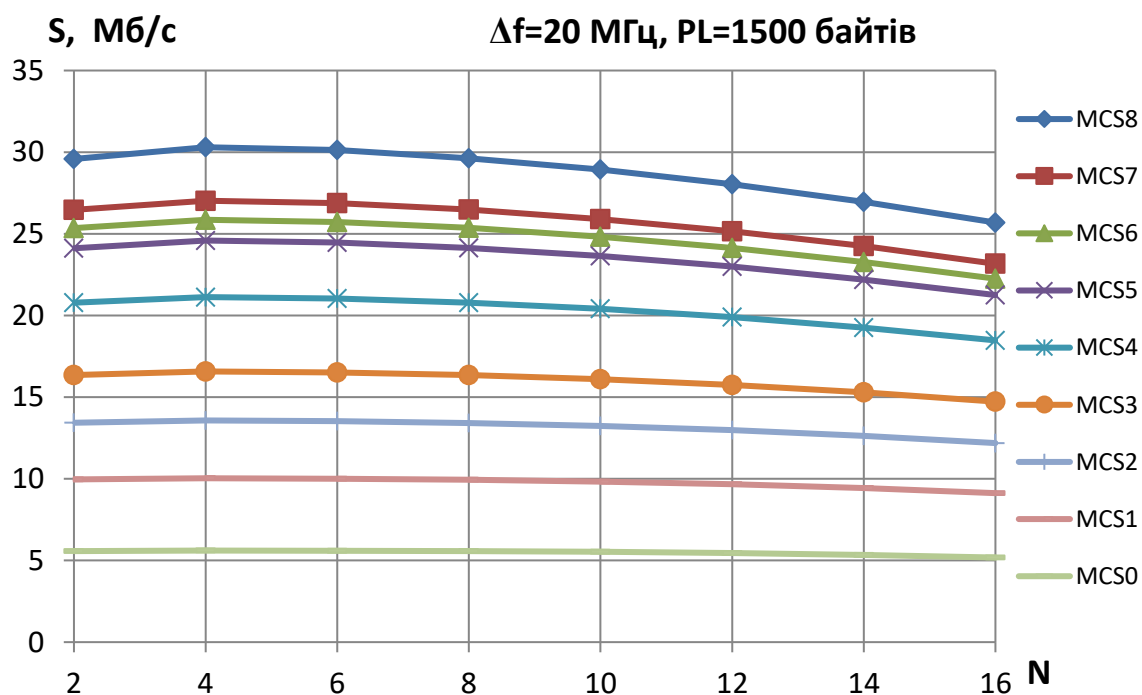


Рисунок 2.12 – Пропускна здатність мережі з частотною смугою 20 МГц в однопотоковому режимі PL=1500 байтів

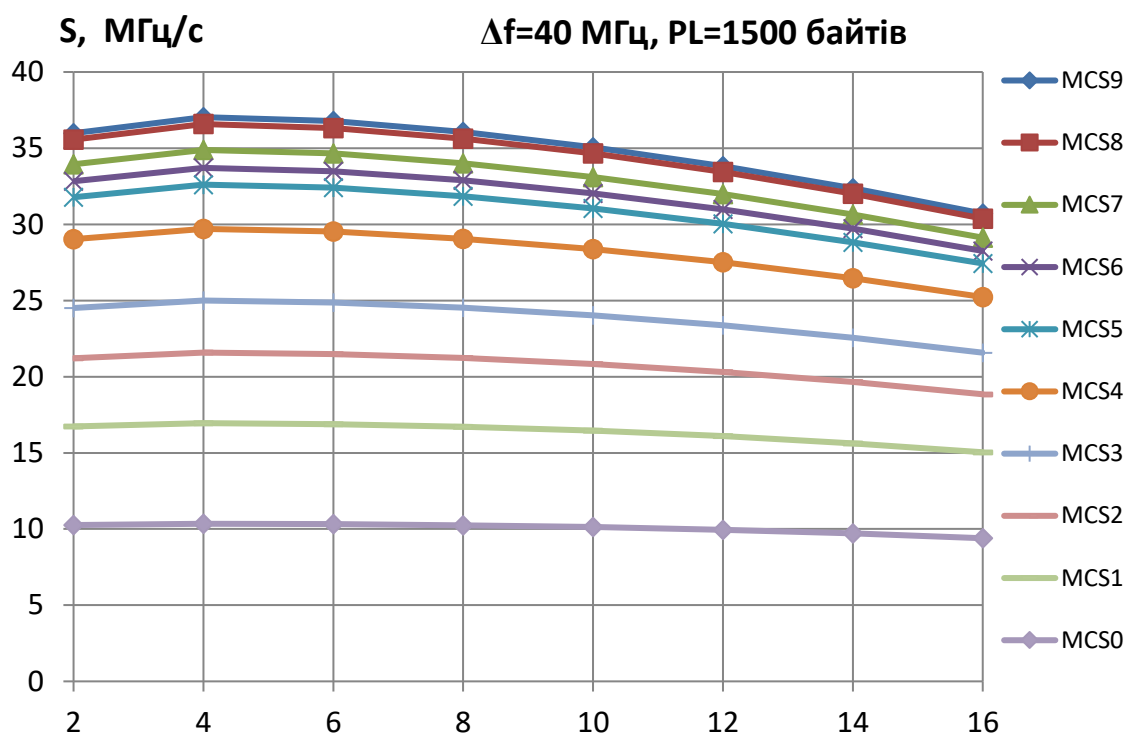


Рисунок 2.13 – Пропускна здатність мережі з частотною смугою 40 МГц в однопотоківому режимі PL=1500 байтів

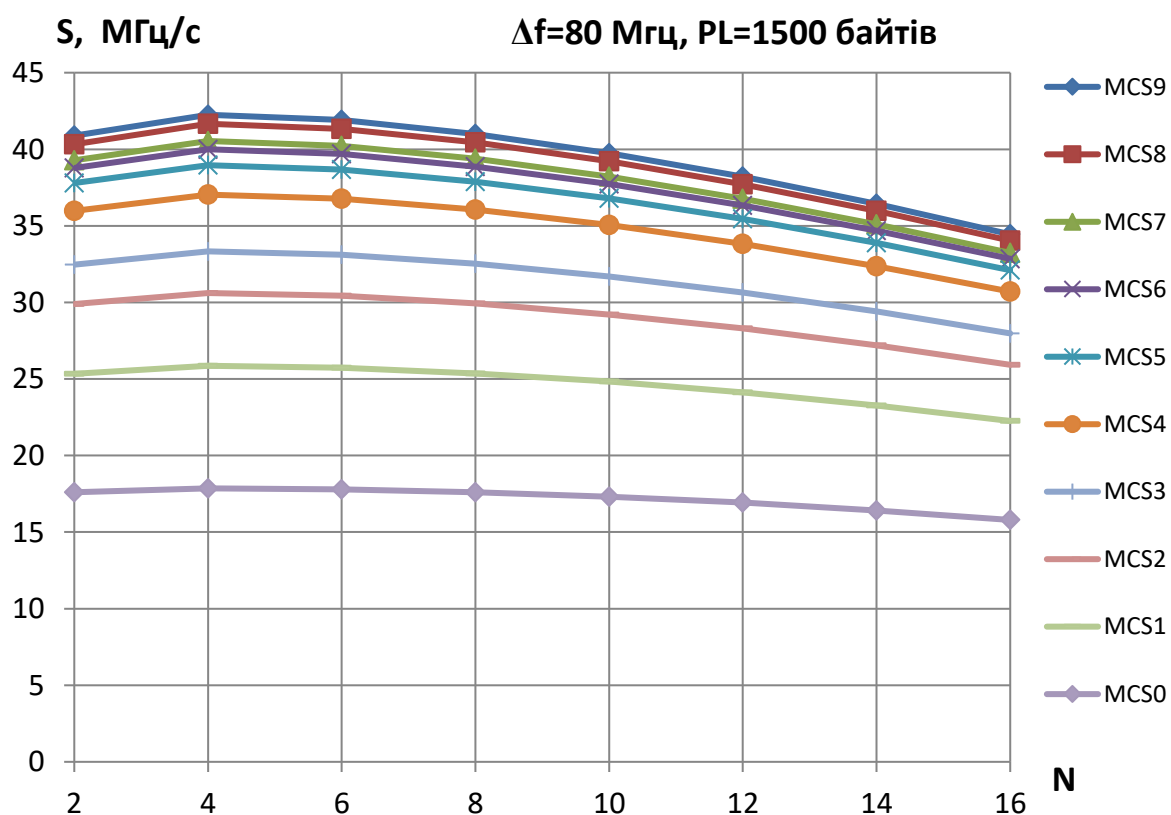


Рисунок 2.14 – Пропускна здатність мережі з частотною смугою 80 МГц в однопотоківому режимі PL=1500 байтів

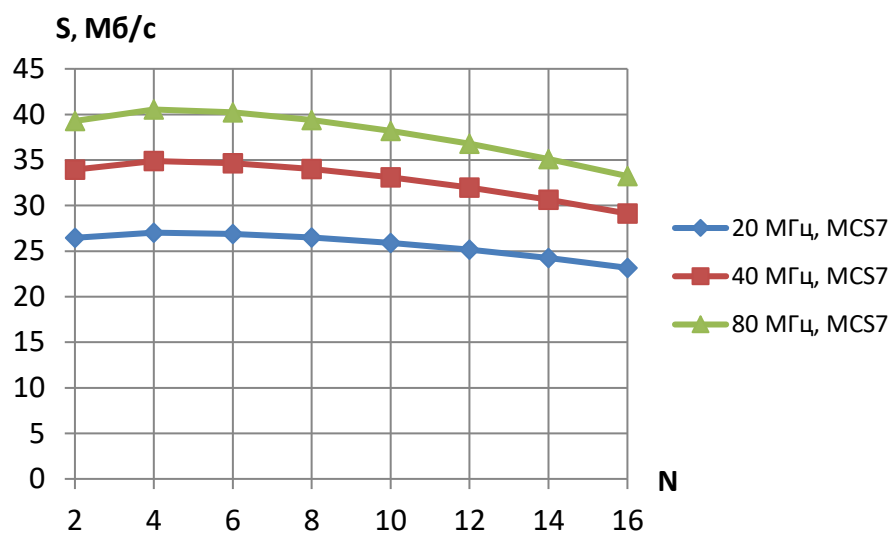


Рисунок 2.15 – Пропускна здатність мережі в режимі MCS7, $PL=1500$ байтів

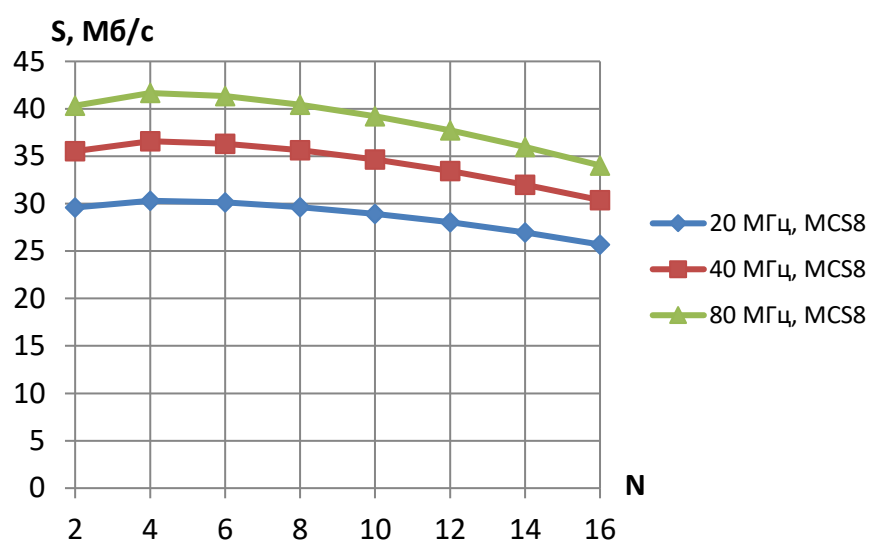


Рисунок 2.16 – Пропускна здатність мережі в режимі MCS8, $PL=1500$ байтів

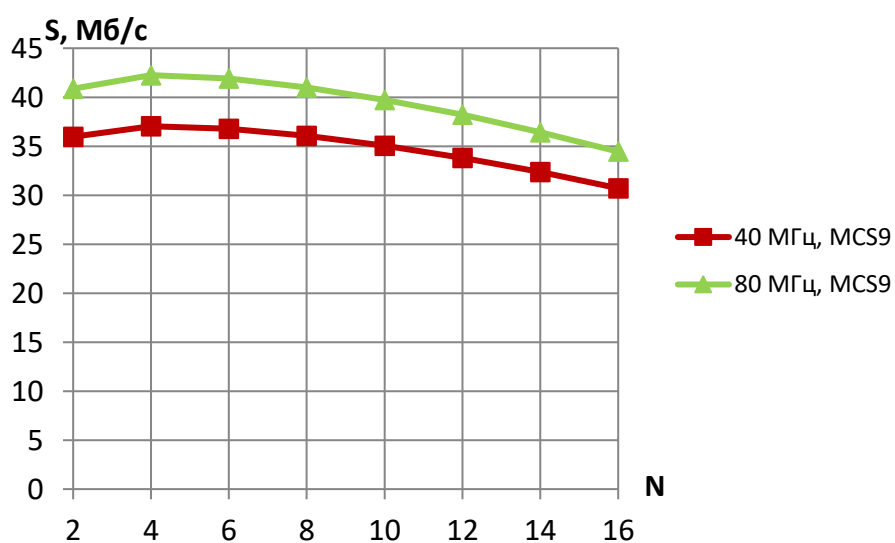


Рисунок 2.17 – Пропускна здатність мережі в режимі MCS9, $PL=1500$ байтів

У дослідженні зроблено розрахунки пропускної здатності каналів з шириною частотної смуги 20, 40 і 80 МГц. Таку ширину частотної смуги мають підтримувати всі пристрої мережі IEEE 802.11ac. Отримані результати можна поширити на характеристики каналів з шириною частотної смуги 160 МГц, які стандартом передбачено використовувати не обов'язково, опційно.

Наведені на графіках результати розрахунків пропускної здатності для мереж з частотними каналами 20, 40, 80 МГц залежно від систем модуляції і кодування (MCS) підтверджують раніше зроблені зауваження стосовно співвідношення пропускної здатності каналу і швидкості передавання блоку даних в інформаційному кадрі.

Так, в режимі MCS9 в каналі з частотною смугою 40 МГц в разі застосування захисного інтервалу 0,4 мкс швидкість передавання корисних даних становить 200 Мбіт/с (табл. 1.4), а максимальна пропускна здатність каналу ($PL=1500$ байтів, чотири активні станції в насиченому режимі, рис. 2.12) через великі непродуктивні витрати часу становить 37,0357 Мбіт/с. Тобто максимальна пропускна здатність каналу становить 18,518 % від швидкості передавання даних. Ефективність використання безпроводового каналу для передавання даних можна охарактеризувати коефіцієнтом корисного навантаження $k_{\text{кн}}$, який дорівнює відношенню пропускної здатності каналу до фізичної швидкості передавання даних. В даному разі $k_{\text{кн}} = 0,185$.

В каналі з частотною смугою 80 МГц максимальна швидкість передавання даних із застосуванням одного просторового потоку без агрегування кадрів становить 433,3 Мб/с, а максимальна пропускна здатність каналу становить 42,252 МГц або 9,75 % від швидкості передавання даних. Коефіцієнт корисного навантаження $k_{\text{кн}} = 0,0975$.

За результатами розрахунків можна отримати оцінку збільшення пропускної здатності каналу при переході на різні швидкості протизавадного кодування. Найбільш цікавими є режими з високою швидкістю передавання даних. Графіки залежностей для MCS5, MCS6, MCS7 (модуляція QAM-64, швидкості коду 2/3, 3/4, 5/6 відповідно), рис. 2.9 – 2.14, розташовані близько

один до іншого. Зміна швидкості протизавадного коду призводить до зміни пропускної здатності від 9% до 9,9% в каналі 20 МГц, від 6,18% до 6,49% в каналі 40 МГц і від 3,52% до 4,32% в каналі 80 МГц.

Розглянемо, як змінюється пропускна здатність каналу в мережі з чотирма активними станціями (максимальна пропускна здатність) в разі переходу від MCS5 до MCS6 і від MCS5 до MCS7. Так в каналі 20 МГц перехід від MCS5 до MCS6 в режимі насиченого навантаження з обсягом 1500 байтів корисного навантаження в кадрі, рис.2.9, збільшує пропускну здатність на 4,3 % (з 24,589 до 25,861 Мб/с), а перехід від MCS5 до MCS7 збільшує пропускну здатність на 9,91 % (з 24,589 до 27,026 Мб/с).

В каналі 40 МГц, рис.2.10, перехід від MCS5 до MCS6 збільшує пропускну здатність на 3,37 % (з 32,608 до 33,707 Мб/с), а перехід від MCS5 до MCS7 збільшує пропускну здатність на 6,98 % (з 32,608 до 34,883 Мб/с).

В каналі 80 МГц, рис.2.11, перехід від MCS5 до MCS6 збільшує пропускну здатність на 2,67 % (з 38,96 до 39,999 Мб/с), а перехід від MCS5 до MCS7 збільшує пропускну здатність на 4,05 % (з 38,96 до 40,539 Мб/с). Тобто в каналах з більшою шириною частотної смуги збільшення швидкості протизавадного кодування призводить до меншої відносної зміни пропускної здатності.

У разі застосування систем модуляції і кодування MCS8 і MCS9 (модуляція QAM-256, швидкості протизавадного коду 3/4 та 5/6 відповідно), рис.2.13, перехід від MCS8 до MCS9 в каналі з частотною смугою 40 МГц збільшує пропускну здатність на 1,24 % (з 36,584 до 37,036 Мб/с), а в каналі з частотною смугою 80 МГц, рис. 2.14, – на 1,4 % (з 41,665 до 42,252 Мб/с).

Графіки, наведені на рис.2.15-2.17, наглядно ілюструють зміну пропускної здатності каналу у разі збільшення ширини частотної смуги. Розглянемо зміни пропускної здатності мережі для найбільш швидкісних режимів роботи мережі.

Так, у разі насиченого навантаження станцій мережі з обсягом корисного навантаження кадру даних PL=1500 байтів в режимі MCS7 збільшення

частотної смуги з 20 МГц до 40 МГц призводить до збільшення максимальної пропускної здатності на 29 % (з 27,026 до 34,882 Мб/с), а збільшення частотної смуги з 20 МГц до 80 МГц – на 50 % (з 27,026 до 40,539 Мб/с).

Якщо в мережі застосовано систему модуляції і кодування MCS8 збільшення частотної смуги з 20 МГц до 40 МГц призводить до збільшення максимальної пропускної здатності на 20,73 % (з 30,302 до 36,584 Мб/с), а збільшення з 20 МГц до 80 МГц – на 37,5 % (з 30,302 до 41,665 Мб/с).

У разі застосування в мережі системи модуляції і кодування MCS9 збільшення частотної смуги з 40 МГц до 80 МГц призводить до збільшення максимальної пропускної здатності на 14,0973 % (з 37,036 до 42,256 Мб/с).

2.4 Пропускна здатність мережі з максимальним навантаженням агрегованими кадрами

З результатів попередніх досліджень випливає, що зі збільшенням корисного навантаження кадру пропускна здатність каналу збільшується. Щоб з'ясувати максимально можливу пропускну здатність каналу в режимі з одним просторовим потоком визначимо пропускну здатність каналу в разі насиченого навантаження агрегованими кадрами максимальної величини.

Як було зазначено в 1.5 максимальний розмір кадру MPDU (MAC protocol data unit) становить 11454 байтів. В цьому кадрі, рис. 1.6, є преамбула, яку передають з малою швидкістю протягом 44 мкс в разі призначення кадру одному адресатові, та блок агрегованих даних, в якому кожен пакет мережного рівня належить тому самому сервісу і відокремлений від іншого обмежувачем, що містить 2 байти, а також має додатковий заголовок, що містить також 2 байти.

Щоб сформувати агрегований кадр MPDU максимальної величини використаємо пакети мережного рівня, розмір яких наближений до MTU (Maximum Transmission Unit – максимальний блок даних для передавання). Для більшості точок доступу MTU за початковим налаштуванням становить 1500

байтів.

Будемо робити розрахунок у такий спосіб, щоб сформувати максимально великий файл MPDU із великих вхідних пакетів однакової величини, розмір яких не перевищує MTU.

За результатами додаткових розрахунків визначили, що для реалізації наведеного вище підходу треба використовувати пакети (MSDU) розміром 1427 байтів. Всього таких пакетів в агрегованому кадрі MPDU буде вісім. Тоді навантаження максимально великого MPDU становитиме $MPDU_{max} = 1427 \text{ байтів} \cdot 8 + 4 \text{ байти} \cdot 7 = 11444 \text{ байтів}$, рис.2.18.

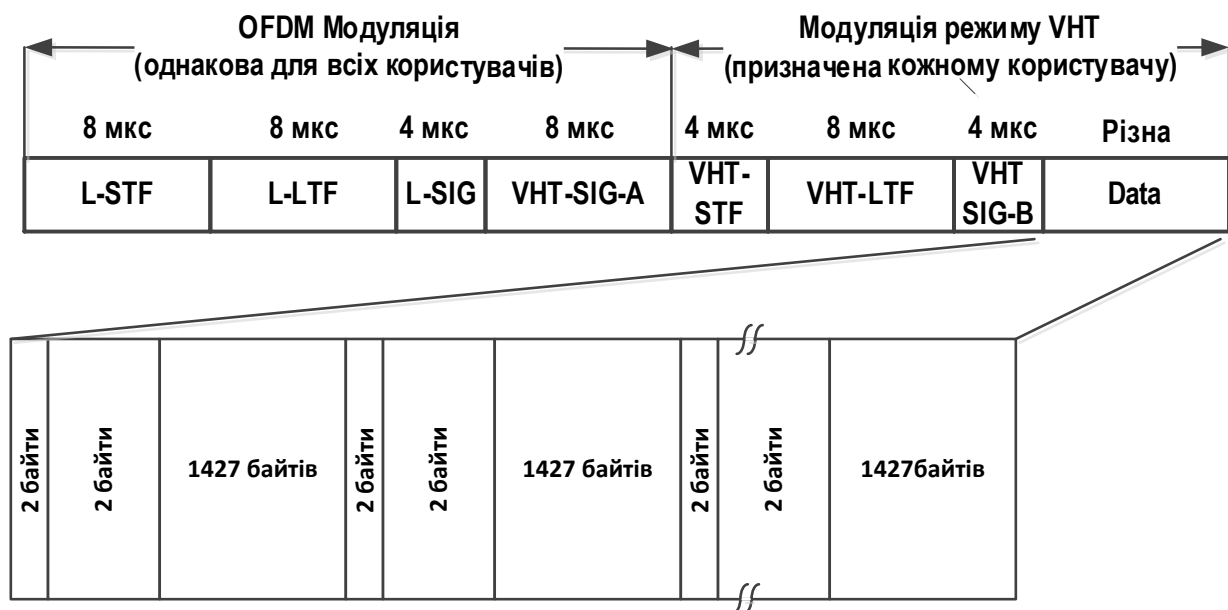


Рисунок 2.18 – Структура агрегованого кадру для розрахунку
максимальної пропускної здатності каналу

Вважаємо, кожен пакет мережного рівня (MSDU) містить крім корисних даних заголовки IP – 20 байтів, заголовки UDP – 8 байтів, циклічну суму FCS – 4 байти. Тобто корисне навантаження кожного із об'єднаних кадрів становитиме 1395 байтів. Корисне навантаження (PL) всього агрегованого кадру становитиме 11160 байтів.

Зробимо розрахунок для двох пріоритетів, коли точка доступу передає агреговані кадри в насиченому режимі одному користувачу із загальним пріоритетом (AC_BE) і з пріоритетом відеопотоку (AC_VI). Розрахунок робимо згідно з розподілом часових інтервалів наведених на рис. 1.4. Потребує

розрахунку інтервал часу безпосереднього передавання агрегованого кадру. Тривалість інших часових інтервалів визначена в попередніх розрахунках: $AIFS(AC_BE) = 43$ мкс, $AIFS(AC_VI) = 34$ мкс, $SIFS = 16$ мкс, $T_{RTS} = T_{CTS} = 28$ мкс, $T_{ACK} = 32$ мкс. Також враховано, що $CW_{min}(AC_VI) = 7$, $CW_{min} AIFS(AC_BE) = 15$. Для розрахунку застосовано параметри модуляції і кодування найбільш швидкісних режимів: для каналу з частотною смугою 20 МГц – MCS8, а для каналів 40, 80 і 160 МГц – MCS9.

Розрахунок тривалості циклу передавання агрегованого кадру робимо за формулою (2.4), а розрахунок пропускної здатності за формулою (2.3). Результати розрахунків максимальної пропускної здатності безпроводового каналу мережі IEEE802.11ac з одним просторовим потоком наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Пропускна здатність каналу IEEE802.11ac в режимі навантаження агрегованими кадрами PSDU максимальної величини

Δf , МГц	PL , байтів	T_{PL_BE} , мкс	S_{AC_BE} , Мбіт/с	T_{PL_VI} , мкс	S_{AC_VI} , Мбіт/с
20	11160	1323,7	66,187	1278,7	68,471
40	11160	692,9	118,834	647,9	126,405
80	11160	455,3	173,530	410,3	194,977
160	11160	361,7	224,040	316,7	252,560

В табл. 2.3 застосовано такі позначення:

- T_{PL_BE} , T_{PL_VI} - тривалість циклу передавання агрегованого кадру з пріоритетом AC_BE та AC_VI відповідно;
- S_{AC_BE} , S_{AC_VI} – пропускна здатність каналу в разі передавання агрегованих кадрів з пріоритетами AC_BE та AC_VI відповідно.

Розрахунок тривалості циклу передавання одного агрегованого кадру здійснено згідно з (2.4). Усереднений час затримки обумовлений лічильником зворотного відліку становитиме: $CW_{min}(AC_VI)/2=3,5$ та $CW_{min} AIFS(AC_BE)/2=7,5$. 160 – 12,7%, 20 – 3,45%

Графічну інтерпретацію отриманих розрахункових результатів наведено на рис. 2.19.

Визначимо коефіцієнт корисного навантаження для режимів з максимальною пропускнуою здатністю каналу.

Згідно з даними, наведеними в табл. 1.4 максимальні швидкості передавання даних в дуже швидкісному режимі функціонування мережі IEEE802.11ac становлять: в частотному каналі 20 МГц – 86,7 Мбіт/с, в частотному каналі 40 МГц – 200 Мбіт/с, в частотному каналі 80 МГц – 433,3 Мб/с, в частотному каналі 160 МГц – 866,7 Мб/с.

Коефіцієнт корисного навантаження з урахуванням даних, наведених в табл. 2.3 буде: для каналу з частотною смугою 20 МГц – $k_{\text{KH}} = 67,447:86,7 = 0,784$ в разі передавання насиченого трафіку з пріоритизацією AC_BE і $k_{\text{KH}} = 69,821:86,7 = 0,805$ в разі передавання насиченого трафіку з пріоритизацією AC_VI.

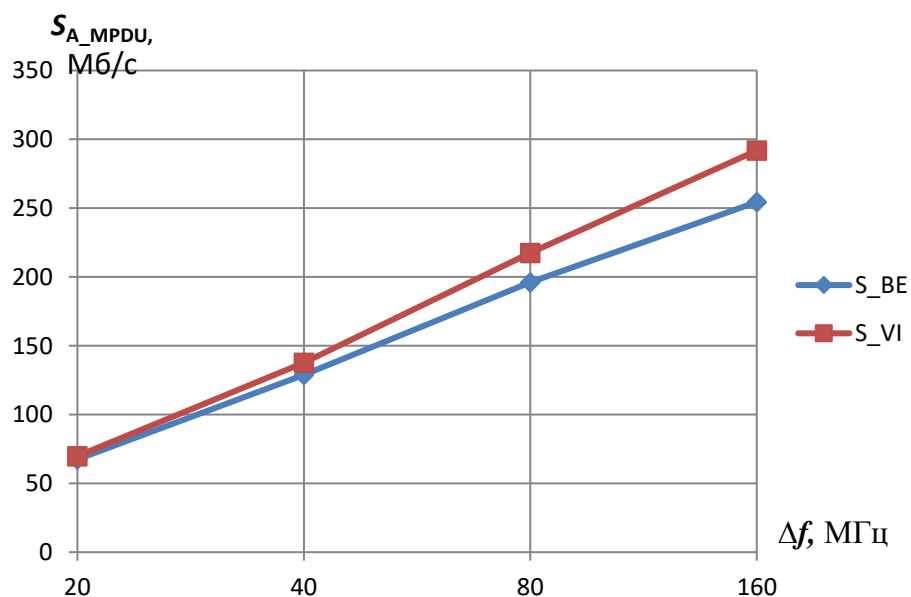


Рисунок 2.19 – Залежність максимальної пропускнуої здатності безпроводового каналу IEEE802.11ac в режимі насиченого навантаження агрегованими кадрами

Коефіцієнт корисного навантаження для безпроводових каналів з частотними смугами 40, 80 і 160 МГц, обчислений аналогічним чином,

наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Значення коефіцієнта корисного навантаження для безпроводових каналів IEEE802.11ac з максимальною пропускною здатністю

$k_{\text{кн}}$							
$\Delta f = 20$ МГц		$\Delta f = 40$ МГц		$\Delta f = 80$ МГц		$\Delta f = 160$ МГц	
АС_BE	АС_VI	АС_BE	АС_VI	АС_BE	АС_VI	АС_BE	АС_VI
0,784	0,805	0,644	0,689	0,453	0,502	0,294	0,337

Коефіцієнт корисного навантаження можна використати для оцінювання ефективності застосування певних технологічних прийомів для передавання потоків даних. Так, наприклад, використання окремо восьми каналів завширшки 20 МГц ($k_{\text{кн}} = 0,784$) дасть можливість передати більше інформації ніж один канал завширшки 160 МГц ($k_{\text{кн}} = 0,294$). Цей результат можна отримати також із графічної залежності на рис. 2.19, а також шляхом порівняння пропускної здатності каналів з різною шириною частотної смуги, наведеної в табл.2.4.

Тобто збільшення ширини частотної смуги радіочастотного каналу в мережах IEEE802.11ac в разі використання агрегованих кадрів MPDU не призводить до збільшення ефективності використання частотного ресурсу в зонах щільного розташування мереж передавання даних, хоча і збільшує пропускну здатність безпроводового каналу конкретної мережі.

Окремо розглянемо питання щодо пропускної здатності каналу мережі IEEE802.11ac в разі застосування максимально великих агрегованих кадрів PPDU.

Максимальна величина кадру в такому разі обмежена не якимось конкретним числом, а часом передавання агрегованого кадру. Згідно зі специфікацією IEEE802.11ac цей час становить 5,484 мс.

Вважаємо, що агреговані кадри максимальної величини сформовані із вхідних пакетів (MSDU) розміру 1500 байтів. Корисне навантаження кожного кадру MSDU з урахуванням заголовку IP (20 байтів), UDP (8 байтів), циклічної

суми (4 байти) становить 1468 байтів. Враховано, що до кожного блоку 1500 байтів додано роздільник і MAC заголовок (разом 4 байти).

Результати розрахунку пропускної здатності в разі використання максимально великих агрегованих кадрів із застосуванням пріоритету BE в каналі з одним просторовим потоком наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Пропускна здатність каналу з агрегованими кадрами PPDU максимальної тривалості

Δf , МГц	N_P	T_A мкс	n_{OFDM}	n_f	S , Мбіт/с
20	37	5424,1	1426	52	84,644
40	86	5344,9	1404	108	188,962
80	186	5456,5	1435	234	400,254
160	373	5470	1439	468	800,693

В табл.2.5 використано такі позначення: N_P – кількість пакетів мережного рівня, об'єднаних в агрегованому кадрі, T_A – тривалість циклу передавання агрегованого кадру, n_{OFDM} – кількість символів OFDM для передавання одного агрегованого кадру, n_f – кількість носійних частот, що переносять потік даних в одному символі OFDM.

На швидкість передавання даних в реальних мережах буде впливати темп надходження пакетів мережного рівня, що залежить від джерела вхідної інформації, завантаженість процесора і швидкісні характеристики інтерфейсів приймальної станції, наявність конкуренції за доступ до середовища передавання.

Висновки до розділу

Застосування методу розрахунку параметрів безпроводової мережі IEEE 802.11 ac, заснованого на концепції віртуального конкурентного вікна, дозволило отримати детальну кількісну оцінку експлуатаційних параметрів такої мережі залежно від застосованого режиму функціонування.

Зі збільшенням кількості активних станцій у безпроводовій мережі сумарна пропускна здатність зростає в інтервалі від однієї до чотирьох станцій внаслідок зменшення усередненої величини конкурентного вікна, а потім зменшується через виникнення колізій, тим швидше, чим більше станцій у мережі.

Згідно з оцінками, отриманими для безпроводового каналу з частотною смугою 20 МГц затримка передавання кадру збільшується майже пропорційно кількості активних станцій і коливається від 0,605 мс до 5,293 мс, у разі корисного навантаження кадрів, що дорівнює 512 байтів у кадрах даних, і від 0,785 до 6,41 мс, якщо корисне навантаження дорівнює 1500 байтів, при зміні кількості активних станцій у мережі від 2 до 16. Нерівномірність затримки в разі застосування двійкового показникового закону збільшення значення конкурентного вікна CW перевищує тривалість середньої затримки і зростає не лінійно в разі збільшення кількості активних станцій від однієї до шести ($CW_{\min}=15$), а потім зростає лінійно, коли кількість активних станцій перевищує шість.

На підставі отриманих результатів можна узагальнити, що під час оцінювання пропускної здатності безпроводової мережі необхідно враховувати структуру потоку (розміри блоків даних) і структуру з'єднання. Якщо дані передаються між станцією та точкою доступу, то матиме місце максимальна швидкість передавання даних, а якщо дані передаються між двома станціями однієї мережі, то максимально можлива швидкість передавання зменшується вдвічі, оскільки існує два з'єднання, і два акти передавання відбуваються із застосуванням одного каналу: від станції відправника до ТД і від ТД до станції одержувача.

Збільшення ширини частотної смуги безпроводового каналу в однопотоковому режимі є не дуже ефективним засобом збільшення пропускної здатності каналу за відсутності агрегування пакетизованого потоку даних. У швидкісних режимах перехід від частотної смуги 20 МГц до 80 МГц в разі застосування системи модуляції та кодування MCS7 призводить до збільшення

пропускної здатності на 50%, в разі застосування MCS8 – на 37,5%, а в разі застосування MCS9, при переході від смуги 40 МГц до 80 МГц – на 14,1%.

В разі застосування агрегування пакетів мережного рівня в кадрах IEEE802.11ac можливо збільшити пропускну здатність каналу за відсутності конкуренції до максимальної величини зазначеної в табл.1.4. Але досягти максимальної розрахункової пропускної здатності практично не можливо оскільки швидкість передавання даних в реальних мережах залежить від темпу надходження пакетів мережного рівня, що залежить від джерела вхідної інформації, завантаженості процесора і швидкісних характеристик інтерфейсів приймальної станції, наявності конкуренції за доступ до середовища передавання.

В разі застосування агрегованих кадрів для передавання насиченого трафіку (наприклад, «закачка» великих файлів) пропускна здатність безпроводового каналу значно зростає. Так в разі агрегування вхідних файлів PSDU до максимального рівня передбаченого в специфікації IEEE802.11ac (11454 байти) пропускна здатність каналу зростає до 68,5 Мбіт/с ($k=78,97\%$) в каналі 20 МГц, до 126,4 Мбіт/с ($k=62,2\%$) в каналі 40 МГц і до 195 ($k=45\%$) Мбіт/с в каналі 80 МГц, що значно підвищує ефективність використання частотного ресурсу мережі.

При застосуванні агрегованих кадрів PPDU максимальної величини можна досягти максимальної пропускної здатності каналу ($k=92,4\%$ в каналі 80 МГц), але це може призвести до значних затримок і нерівномірності затримок в разі наявності в мережі кількох станцій, що функціонують в такому режимі.

3 ЗОНА ОБСЛУГОВУВАННЯ І ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ IEEE 802.11AC

Метою здійснених досліджень є проаналізувати параметри зони обслуговування точки доступу мережі стандарту IEEE 802.11ac, залежно від параметрів модуляції й кодування, а також взаємний вплив мереж IEEE 802.11 на стабільність їх функціонування.

3.1 Особливості зони обслуговування точки доступу безпроводової мережі

У радіоінтерфейсі мережі IEEE 802.11ac використано систему багаточастотної модуляції й кодування OFDM. Основні параметри OFDM сигналів для мереж IEEE 802.11n і IEEE 802.11ac, у разі використання одного, двох і трьох просторових потоків, наведено у табл.1.4.

У табл. 1.4 окрім безпосередньо параметрів сигналів, наведено передбачені у стандарті мінімальні значення відношення сигнал-шум (SNR) та мінімальні значення потужності на вході приймача (RSSI), необхідні для приймання сигналів з певними параметрами модуляції й кодування (MCS). RSSI іще називають чутливістю приймача. Із застосуванням цих параметрів можна зробити оцінювання розмірів зони обслуговування точки доступу, залежно від застосованої швидкості передавання й випромінюваної потужності. Слід зауважити, що перехід на більшу або меншу швидкість передавання, здійснюваний точкою доступу (ТД) автоматично, може бути обумовлений, наприклад, появою або відсутністю помилкових кадрів під час передавання, внаслідок зміни електромагнітної обстановки.

Спочатку розглянемо межі зони обслуговування за ідеальних умов розповсюдження сигналу. Тобто, коли на шляху розповсюдження сигналу нема перешкод, і присутні тільки теплові шуми.

За цього визначимо, на якій відстані від точки доступу буде досягнуто

мінімально необхідної потужності прийнятого сигналу для різних значень MCS тобто визначимо радіус зони обслуговування у вільному просторі.

Максимальну потужність випромінювання радіоелектронних засобів в частотній смузі 5150 – 5850 МГц в Україні обмежено на рівні 100 мВт. Частотні смуги можливих радіоканалів мереж IEEE 802.11ac наведено на рис.1.1.

Спектральну маску для каналу мережі IEEE 802.11 з частотною смугою 20 МГц наведено на рис. 1.6.

Визначимо зону покриття точки доступу з максимально можливою еквівалентною випромінюваною потужністю $P_{AP} = 100$ мВт (20 дБм). Зробимо узагальнений розрахунок для частоти 5,4 ГГц, що є серединою робочого діапазону 5 ГГц, із застосуванням формули загасання у вільному просторі [53]:

$$L = \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f}{c} \right)^2, \quad (3.1)$$

де d – відстань від точки доступу до точки приймання, м;

f – частота радіосигналу, Гц;

c – швидкість світла ($3 \cdot 10^8$ м/с).

Із співвідношення (3.1) знаходимо:

$$d = \frac{c \cdot \sqrt{L}}{4 \cdot \pi \cdot f} = 0,00442 \cdot \sqrt{L}. \quad (3.2)$$

Величину загасання сигналу L до межі зони обслуговування для різних значень MCS в термінах стандарту IEEE 802.11 можна визначити через випромінювану потужність точки доступу (P_{AP}) і необхідну мінімальну потужність на вході приймача радіосигналу необхідну для приймання сигналу $RSSI$:

$$L, \text{дБ} = P_{AP} - RSSI. \quad (3.3)$$

Отримані згідно з (3.3) значення загасання і розраховані згідно з (3.2)

відстані до межі зони обслуговування наведено в табл. 3.1.

У табл. 3.1 наведено також значення відношення сигнал-шум (SNR^*) для сигналів на межі зони обслуговування, розраховане тільки з урахуванням теплового шуму в каналі, для перевірки умови їх надійного приймання. Рівень відношення сигнал-шум (SNR^*), розрахований для точки приймання, визначеної з умови мінімально необхідної потужності на вході приймача, перевищує мінімально необхідні значення відношення сигнал-шум (SNR) для всіх режимів, наведених у табл. 1.4. Тобто за умови відсутності додаткових завад межа зони обслуговування визначається тільки мінімально необхідним рівнем потужності на вході приймача.

Таблиця 3.1 – Загасання сигналу і радіус зони обслуговування

20 МГц	MCS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	L , дБ	102	99	97	94	90	86	85	84	79	77
	d , м	556,45	393,93	312,91	221,52	139,77	88,19	78,60	70,05	39,39	31,29
	SNR^* , дБ	18,849	21,849	23,849	26,849	30,849	34,849	35,849	36,849	41,849	43,849
	SNR , дБ	2	5	9	11	15	18	20	25	29	31
40 МГц	L , дБ	99	96	94	91	87	83	82	81	76	74
	d , м	393,93	278,88	221,52	156,83	98,95	62,43	55,64	49,59	27,89	22,15
	SNR^* , дБ	18,849	21,849	23,849	26,849	30,849	34,849	35,849	36,849	41,849	43,849
	SNR , дБ	5	8	12	14	18	21	23	28	32	34
80 МГц	L , дБ	96	93	91	88	84	80	79	78	73	71
	d , м	278,88	197,43	156,83	111,03	70,05	44,20	39,39	35,11	19,74	15,68
	SNR^* , дБ	18,849	21,849	23,849	26,849	30,849	34,849	35,849	36,849	41,849	43,849
	SNR , дБ	8	11	15	17	21	24	26	31	35	37
160 МГц	L , дБ	93	90	98	85	81	77	76	75	70	68
	d , м	197,43	139,77	111,03	78,60	49,59	31,29	27,89	24,86	13,98	11,10
	SNR^* , дБ	18,849	21,849	23,849	26,849	30,849	34,849	35,849	36,849	41,849	43,849
	SNR , дБ	11	14	18	20	24	27	29	34	38	40

Відношення сигнал-шум на вході приймача абонентської станції визначено за співвідношенням [25]:

$$SNR^* = \frac{RSSI}{k \cdot T \cdot B} \quad \text{або} \quad SNR^*, \text{дБ} = 10 \lg \frac{RSSI}{k \cdot T \cdot B}, \quad (3.4)$$

де $RSSI$ – мінімальне значення потужності на вході приймача, необхідне для приймання сигналу, Вт;

k – стала Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T – абсолютна температура середовища, К;

B – ширина частотної смуги радіоканалу, Гц.

За результатами, наведеними в табл. 3.1, можна з'ясувати залежність розмірів зони обслуговування мережної точки доступу від режиму модуляції й кодування і від ширини частотного каналу. Так, зі зміною модуляції від QPSK (MCS1: швидкість коду 1/2) до 256-QAM (MCS8: швидкість коду 4/3) в каналі з частотною смугою 20 МГц радіус зони обслуговування у вільному просторі змінюється від 394 м до 39 м. Тобто, залежно від способу модуляції і швидкості протизавадного коду, радіус зони обслуговування може змінюватись в 10 разів. Ця залежність має місце і в мережах з іншою шириною частотної смуги каналу, табл.3.1. Зокрема в каналі з частотною смугою 160 МГц радіус зони обслуговування змінюється від 140 м (MCS1) до 11 м (MCS9: QPSK, швидкість коду 5/6). Перехід на більш захищений спосіб модуляції й кодування (менша швидкість передавання даних) відбувається, у разі збільшення рівня завад і додаткового загасання сигналу в каналі, щоб уникнути втрати кадрів даних або кадрів керування.

На підставі зроблених зауважень можна зробити висновок, що максимальна швидкість передавання даних для абонентів, що знаходяться поблизу точки доступу може бути в кілька разів більше ніж для абонентів, що знаходяться на більшій відстані від точки доступу навіть за ідеальних умов.

Залежність радіусу зони обслуговування від ширини частотної смуги радіочастотного каналу обумовлена обмеженням випромінюваної потужності передавачів мережних станцій. За цього, в разі подвоєння частотної смуги в 2

рази, радіус зони обслуговування зменшується приблизно в 1,4 рази, табл.3.1. Так, у разі використання частотного каналу 20 МГц і режиму модуляції й кодування MCS1, радіус зони обслуговування становитиме 394 м, а в разі використання такого ж режиму в мережі з шириною частотного каналу 40 МГц – 279 м. У разі збільшення ширини частотної смуги каналу в 4 рази радіус зони обслуговування зменшується у 2 рази. Зазначена залежність радіусу зони обслуговування від ширини частотної смуги каналу має місце для всіх режимів модуляції й кодування.

3.2 Зона обслуговування точки доступу в режимі MIMO

Вважають, що одним із ефективних засобів підвищення продуктивності функціонування мережі є застосування технології багатопотокового передавання (MIMO – Multiple-Input Multiple-Output). Режим MIMO вперше в технологіях IEEE 802.11 запроваджений у специфікації IEEE 802.11n. Технології MIMO реалізують із застосуванням просторово-часового кодування і поєднують з технологією формування окремих просторових потоків (променів). В просторовому кодуванні застосовують технологію формування діаграми спрямованості антен типу «фазована решітка». Елементами такої решітки є антени точки доступу (зазвичай штирові). Для часового кодування корисний інтервал передавання символу OFDM ділять на дві однакові частини, в кожній із яких передають оригінальну комбінацію сигналів даних [54].

Сигнальні потоки, випромінювані кожною антеною в бік абонентської станції є комбінацією потоків даних, що надійшли на вхід точки доступу. На рис. 3.1 наведено схему передавання двох потоків за схемою MIMO(2×2).

Нижче наведені узагальнені співвідношення для режиму передавання двох просторових потоків (ПП) від точки доступу до користувача [55].

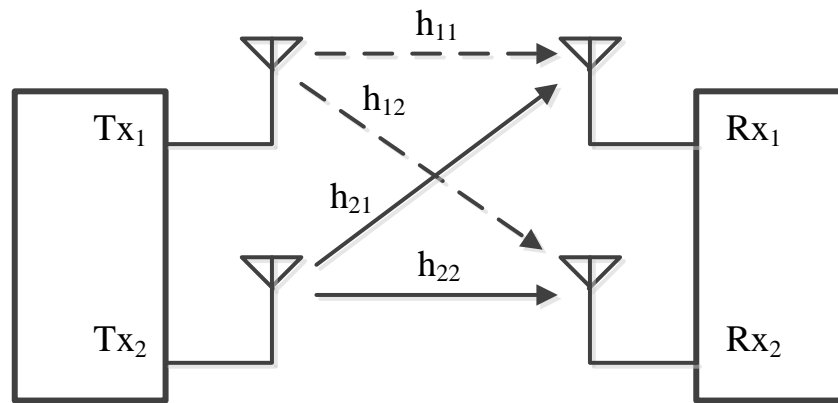


Рисунок 3.1 – Схема передавання двох просторових потоків між пристроями IEEE802.11ac

$$\begin{aligned} y_1(k) &= h_{11}x_1 + h_{12}x_2 + v_1(k) \\ y_2(k) &= h_{21}x_1 + h_{22}x_2 + v_2(k) \end{aligned} \quad \text{або} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{V}, \quad (3.6)$$

де $y_1(k)$, $y_2(k)$ – сигнали передані k -им носійним коливанням OFDM угруповання і прийняті першою і другою антенами приймача відповідно;

h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22} – коефіцієнти передавання між відповідними антенами, рис.3.1;

$v_1(k)$, $v_2(k)$ – шумові компоненти прийнятих сигналів

\mathbf{Y} – матриця прийнятих сигналів; \mathbf{H} – матриця коефіцієнтів передавання безпроводового каналу; \mathbf{X} – матриця сигналів передавача; \mathbf{V} – матриця шумових сигналів.

Специфікацією IEEE802.11ac передбачено можливість формувати до восьми просторових потоків.

Застосування технології формування просторових потоків дозволяє одночасно передати певний обсяг інформації кільком користувачам, наприклад так, як це наведено на рис. 3.2 [2].

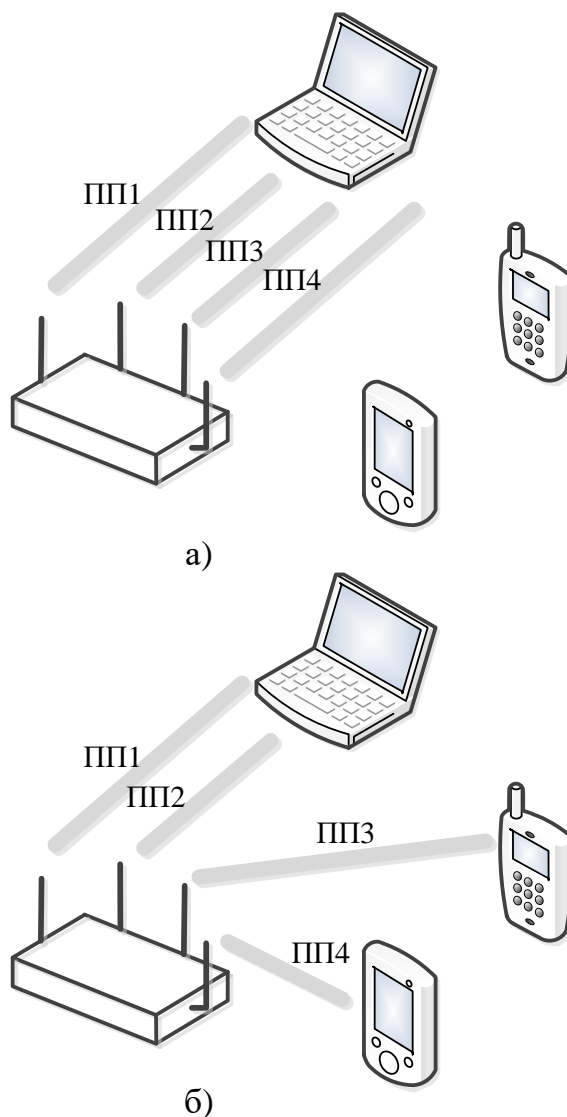


Рисунок 3.2 – Приклад розподілу просторових потоків (ПП)

На рис.3.2а наведено схему передавання чотирьох просторових потоків (ПП1, ..., ПП4) одному користувачу (MIMO). На рис.3.1б наведено схему передавання двох потоків до ноутбуку і по одному потоку до смартфона і планшету (MU-MIMO).

На швидкість передавання кожним просторовим потоком буде впливати кілька чинників: відстань від точки доступу до абонентського пристрою, потужність сигналу передавача, рівень завад в навколишньому просторі, непродуктивні витрати часу під час передавання даних в багатопотоковому режимі.

Вважаємо, що умови розповсюдження ідеальні, і зробимо оціночні розрахунки, щоб з'ясувати як режим передавання з кількома просторовими потоками вплине на розміри зони обслуговування.

В разі формування кількох просторових потоків випромінювана потужність точки доступу розподіляється між потоками однаковими частками. У зв'язку з тим, що максимальна випромінювана енергія точки доступу (з урахуванням коефіцієнту підсилення антени) адміністративно обмежена, це призводить до того, що випромінювана потужність буде рівномірно розділена між усіма потоками. Тобто для передавання окремого просторового потоку можна використати потужність, що дорівнює загальній потужності передавача поділеній на кількість застосованих просторових потоків. Результати розрахунку радіусу зони обслуговування в разі використання двох, або чотирьох потоків наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Радіус зони обслуговування точки доступу з кількома просторовими потоками (пп)

20 МГц	MCS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	L , дБ	102	99	97	94	90	86	85	84	79	77
	d ,(1пп), м	556,45	393,93	312,91	221,52	139,77	88,19	78,60	70,05	39,39	31,29*
	d ,(2пп), м	394,65	279,38	221,92	157,1	99,13	62,55	55,74	49,68	27,94	22,19*
	d ,(4пп), м	278,22	196,96	156,45	110,76	69,88	44,1	39,3	35,03	19,7	15,65
40 МГц	L , дБ	99	96	94	91	87	83	82	81	76	74
	d ,(1пп), м	393,93	278,88	221,52	156,83	98,95	62,43	55,64	49,59	27,89	22,15
	d ,(2пп), м	279,38	197,79	157,11	111,23	70,18	44,28	39,46	35,17	19,78	15,71
	d ,(4пп), м	196,97	139,44	110,76	78,42	49,48	31,22	27,82	24,8	13,95	11,08
80 МГц	L , дБ	96	93	91	88	84	80	79	78	73	71
	d ,(1пп), м	278,88	197,43	156,83	111,03	70,05	44,20	39,39	35,11	19,74	15,68
	d ,(2пп), м	197,79	140,02	111,23	78,74	49,68	31,35	27,94	24,9	14	11,12
	d ,(4пп), м	139,44	98,715	78,42	55,52	35,03	22,1	19,7	17,56	9,87	7,84
160 МГц	L , дБ	93	90	98	85	81	77	76	75	70	68
	d ,(1пп), м	197,43	139,77	111,03	78,60	49,59	31,29	27,89	24,86	13,98	11,10
	d ,(2пп), м	140,02	99,13	78,74	55,74	35,17	22,19	19,78	17,63	9,91	7,87
	d ,(4пп), м	98,72	69,89	55,52	39,3	24,8	15,65	13,95	12,43	6,99	5,55

Примітка. * – використання режиму для каналу з частотною смугою 20 МГц не передбачено

Як впливає із (3.5) для передавання кількох потоків (в нашому прикладі два потоки, рис.3.1) треба знати коефіцієнт передавання для кожної пари антен приймача і передавача. Для визначення цих коефіцієнтів в преамбулі дуже швидкого режиму специфікації 802.11ac передбачено використовувати великі навчальні поля VHT-LTF, рис. 1.4. Для кожного додаткового поля передбачено застосовувати один символ OFDM тривалістю 4 мкс. Тобто зі збільшенням кількості просторових потоків преамбула кадрів даних буде більш тривалою, що обумовлює збільшення непродуктивних витрат часу. Залежно від кількості переданих потоків, спільне велике навчальне поле може складатися з 2, 4, 6 або 8 символів; кількість необхідних символів округлюється до наступного більшого парного значення, тому для зв'язку з одним потоком використовують два символи (тривалість 8 мкс), а з п'ятьма потоками – шість символів (тривалість 24 мкс).

Вміст поля VHT-LTF використовується для процесу оцінювання каналу, від якого залежить формування променя. Тобто зі збільшенням кількості потоків преамбула кадру даних буде більш тривалою, що призводить до збільшення непродуктивних витрат часу на передавання кадру даних.

Зробимо оцінювання впливу збільшення кількості просторових потоків на пропускну здатність окремого потоку при передаванні байтів даних з корисним навантаженням 512 та 1500 байтів.

Згідно з даними наведеними в табл. А.1 тривалість циклу передавання кадру даних з обсягом корисного навантаження 512 байтів в режимі з одним або двома просторовими потоками в разі застосування MCS7 в каналі з частотною смугою 20 МГц становить 291 мкс, в каналі з частотною смугою 40 МГц – 259 мкс, в каналі з частотною смугою 80 МГц – 239 мкс. У разі переходу до використання трьох або чотирьох потоків тривалості циклу передавання кадру даних збільшиться на 4 мкс, а в разі застосування п'яти або шести потоків – на 16 мкс тощо. Результати розрахунків збільшення тривалості циклу передавання кадру даних наведено в табл. 3.3.

Як впливає з аналізу даних, наведених в табл. 3.3, збільшення

непродуктивних витрат часу за рахунок збільшення кількості VHT-LTF в разі використання більшої кількості просторових потоків не є значним. У разі застосування двох потоків структура кадру даних не змінюється і нема впливу на пропускну здатність кожного потоку. У разі застосування 3 – 4 просторових потоків пропускну здатність кожного потоку зменшується приблизно на 1,5%, а в разі використання 5-6 потоків – на 3% внаслідок збільшення тривалості преамбули дуже швидкого режиму.

Окрім зазначених вище особливостей використання кількох просторових потоків для передавання даних в багатокористувацькому режимі є іще кілька чинників, що зменшують пропускну здатність мережі 802.11ac. Такими чинниками є: умови розповсюдження сформованих променів, вплив потужності бічних пелюсток діаграм спрямованості, призначених іншим користувачам, кутове рознесення абонентів мережі.

Таблиця 3.3 – Тривалість циклу передавання кадру даних за різної кількості просторових потоків

Кількість потоків	1-2			3-4			5-6		
	Тривалість циклу (мкс), відносно збільшення тривалості (%)								
MCS	7	8	9	7	8	9	7	8	9
PL=512 байтів									
$\Delta f=20$ МГц	291, мкс	273,4	269,8	295, мкс 1,37, %	277,4 1,46	273,8 1,48	299 2,75	281,4 3,48	277,8 3,95
$\Delta f=40$ МГц	259	251	248,4	263 1,54	255 1,59	252,4 1,61	267 3,09	259 3,19	256,4 3,22
$\Delta f=80$ МГц	239	239	235	243 1,67	243 1,67	239 1,7	247 3,35	247 3,35	243 3,4
PL=1500 байтів									
$\Delta f=20$ МГц	415	367	352,6	419 0,96	371 1,09	356,6 1,13	423 1,93	375 2,18	360,6 2,27
$\Delta f=40$ МГц	315	299	295	319 1,27	303 1,34	299 1,36	323 2,54	307	303
$\Delta f=80$ МГц	267	259	255	271 1,5	263 1,54	259 1,57	275 2,68	267 3,09	263 3,14

Примітка. В клітинках з двома числами перше число означає тривалість циклу передавання, а друге число означає відносне збільшення тривалості циклу передавання в порівнянні з одним потоком.

Більшу пропускну здатність можна забезпечити за умов багатопроменевого розповсюдження радіохвиль, що обумовлює значну

відмінність коефіцієнту передавання окремого каналу між антеною передавача і антеною приймача, рис.3.1 [56, 57].

Точки доступу IEEE 802.11ac обладнані відносно невеликою кількістю антен (4-8 антен), що є елементами фазованої решітки, які використовують для формування діаграм спрямованості на користувачів. Через невелику кількість зазначених елементів фазованої решітки крім основної діаграми спрямованості будуть формуватись інтенсивні бічні пелюстки [58]. В разі формування діаграм спрямованості для кількох абонентів мережі (режим MU-MIMO) сигнали бічних пелюсток будуть створювати додаткові завади основним сигналам інших абонентів. Специфікацією IEEE 802,11ac передбачено можливість передавати окремі сигнальні потоки чотирьом користувачам [59]. Рівень завад залежить від кутового рознесення абонентів мережі і схеми розташування елементів фазованої решітки. Суттєвим чинником для формування діаграми спрямованості є відстань між штировими антенами, що утворюють антенну систему.

Крім того, MU-MIMO вимагає просторового рознесення. Більшість сучасних корпоративних розгортань Wi-Fi мають високу щільність користувачів і пристроїв, які несумісні з положеннями MU-MIMO. Щоб технологія MU-MIMO працювала, має бути належна фізична відстань між усіма клієнтами та між точками доступу [60].

3.3 Взаємний вплив суміжних мереж на параметри фізичного рівня

За реальних умов, безпроводова мережа IEEE 802.11 межує з іншими подібними мережами, які можуть використовувати такі самі або суміжні частотні смуги радіоканалів. Такий сценарій характерний для офісних приміщень, навчальних закладів, багатоквартирних будинків тощо.

Взаємний вплив електронних пристроїв і систем характеризують рівнем електромагнітної сумісності (ЕМС) і рівнем несприйнятливості.

Рівень електромагнітної сумісності (electromagnetic compatibility level) –

це установлений рівень електромагнітного збурення, який застосовують, як опорний рівень для координації у регулюванні рівнів емісії та несприйнятливості. Рівень несприйнятливості (immunity level) – максимальний рівень електромагнітного збурення, що діє на конкретний прилад, обладнання чи систему, за якого вони зберігають необхідні робочі характеристики [53].

Аби з'ясувати умови найкращої електромагнітної сумісності близько розташованих мереж, що функціонують в одному частотному діапазоні, треба проаналізувати отримані вище результати, а також врахувати вплив додаткових чинників.

У табл. 3.1 привертає увагу режим MCS0 у каналі з шириною частотної смуги 20 МГц, сигнали якого абонентська станція може прийняти на дуже великій відстані (більше 550 м), у порівнянні зі швидкісними режимами. Наприклад, якщо порівнювати з режимом MCS9 у каналі 160 МГц з двома просторовими потоками (11÷15 м). Справа в тому, що режим MCS0 використовують всі станції специфікації IEEE 802.11ac для надійного передавання преамбули кадрів, призначеної для взаємодії з мережними пристроями попередніх специфікацій. Тобто, в разі функціонування двох просторово рознесених мереж у діапазоні 5 ГГц, що використовують однакові частотні смуги, сигнали «старої» преамбули віддаленої мережі можуть суттєво впливати на пропускну здатність даної безпроводової мережі. Мережі, що функціонують з використанням однакових частотних смуг називають співканальними.

Цей вплив обумовлений механізмом оцінювання зайнятості каналу. Як було зазначено в 1.2 точка доступу одночасно використовує два методи оцінювання: виявлення сигналу Wi-Fi і визначення рівня радіочастотної енергії в каналі. Порогові значення рівнів сигналів, що визначають зайнятість каналу, наведено в табл.1.1.

Так, віддалена точка доступу, що функціонує в частотному каналі 20 МГц і знаходиться на відстані 50 м, за умови застосування нею EIRP 20 дБм в

напрямку даної ТД або абонентської станції досліджуваної мережі, сформує сигнал «мінус» 61,065 дБм, що призведе до оцінки зайнятості каналу за двома згаданими вище ознаками.

Щоб забезпечити електромагнітну сумісність мереж, що функціонують в діапазоні 5 ГГц, можна застосувати два підходи. Можна використовувати секторні антени і розташовувати їх з урахуванням загасання радіосигналу при проходженні через перешкоди (стіни, перекриття тощо), але такий підхід не завжди можна реалізувати через випадковий характер розташування безпроводових мереж у незалежних користувачів. Інший підхід полягає у зменшенні випромінюваної потужності точкою доступу та абонентськими пристроями. Цей підхід дає змогу зменшити рівень міжмережних завад, але водночас призводить до зменшення зони обслуговування ТД і зменшення пропускної здатності безпроводового каналу [61].

На практиці в діапазоні 5 ГГц для забезпечення ЕМС безпроводових мереж часто налаштовують ТД на максимальну випромінювану потужність в межах 60–75 мВт [3]. У разі використання потужності передавача 60 мВт, замість 100 мВт, радіус зони обслуговування зменшується на 25%, у порівнянні з відстанями, наведеними в табл. 3.1.

Для забезпечення високих якісних показників функціонування мережі на значних територіях внутрішніх приміщень у діапазоні 5 ГГц доцільно використовувати стільниковий принцип організації мереж із забезпеченням надійного роумінгу між стільниками. Частотні смуги для суміжних стільників локальних мереж треба вибирати так, щоб їхні частотні смуги за можливості не були суміжними.

Висновки до розділу

Високошвидкісні режими передавання даних у безпроводовій мережі IEEE 802.11ac, з причини обмеження максимального значення випромінюваної потужності (ЕІВП) на рівні 100 мВт, можна реалізувати за відсутності

перешкод на шляху розповсюдження радіохвиль в радіусі 10÷15 м від точки доступу.

Розмір зони обслуговування залежить від застосованого в мережі режиму модуляції й кодування, і радіус зони може змінюватись до десяти разів. Цей розмір залежить також від ширини частотної смуги радіоканалу і зменшується вдвічі, у разі збільшення частотної смуги в чотири рази.

Хоча в діапазоні 5 ГГц сигнали частотних смуг окремих каналів на рівні «мінус»20 дБ майже не перекриваються, внаслідок відносно великої інтенсивності позасмугового випромінювання і великої чутливості приймачів, у суміжних частотних каналах можуть виникати помітні взаємні завади під час передавання преамбули попередніх специфікацій стандарту, що зменшує ефективність використання каналного ресурсу.

Співканальні завади можуть надходити від мереж, що знаходяться на відстані в кілька десятків метрів, внаслідок передавання «старої» преамбули кадрів керування і кадрів даних для взаємодії з абонентськими пристроями більш ранніх специфікацій, що може призвести до формування оцінки зайнятості каналу і переходу пристроїв мережі в режим очікування.

Якщо в обмеженому просторі розгорнуто кілька мереж за специфікацією IEEE 802.11ac, слід очікувати, що через обмежену електромагнітну сумісність цих мереж не можна досягти максимальних значень експлуатаційних показників.

Для найбільш ефективного використання можливостей безпроводових мереж специфікації IEEE 802.11ac, під час їх планування треба враховувати чинники фізичного рівня, що впливають на електромагнітну сумісність мереж.

Для забезпечення високих якісних показників функціонування мережі на значних територіях внутрішніх приміщень у діапазоні 5 ГГц доцільно використовувати стільниковий принцип організації мереж із забезпеченням надійного роумінгу між стільниками. Частотні смуги для суміжних стільників локальних мереж треба вибирати так, щоб їхні частотні смуги не були дотичними.

4 ОСОБЛИВОСТЕЙ ПЕРЕДАВАННЯ ГОЛОСОВОГО ТРАФІКУ ЗАСОБАМИ МЕРЕЖ IEEE802.11AC

4.1 Загальні підходи до передавання голосового трафіку IP мережами

Останнім часом значного поширення набула технологія передавання голосового трафіка через IP мережі (VoIP) [62]. Здебільшого використовують IP телефони, з'єднані з IP мережею за технологією Ethernet. Проте, все частіше використовують і безпроводове з'єднання засобами мережі Wi-Fi (стандарт IEEE 802.11) [63]. Перестороги щодо більш широкого використання Wi-Fi виникають у користувачів через нестабільність показників якості (QoS) безпроводових мереж. Технології безпроводових мереж постійно зазнають удосконалення, з метою поліпшити їх якісні показники і розширити сферу їх застосування [64]. Найбільш розповсюдженими натеper є безпроводові мережі стандарту IEEE 802.11 специфікацій IEEE 802.11n та IEEE 802.11ac. Специфікацію IEEE 802.11n призначено для використання як у частотному діапазоні 2,4 ГГц, так і в діапазоні 5 ГГц, а специфікацію IEEE 802.11ac, яку можна вважати удосконаленою версією специфікації IEEE 802.11n, призначеною для використання тільки в діапазоні 5 ГГц. В деяких специфікаціях, що стосуються безпосередньо каналного і фізичного рівнів, IEEE 802.11e передбачено використовувати опційно, а в специфікації IEEE 802.11ac передбачено використовувати її обов'язково [2]. Проте, не можна сказати, що процес пошуку найкращих режимів застосування механізмів якості обслуговування IEEE 802.11e вже завершено [65], тому дослідження в цьому напрямі є актуальними.

Для організації послуги IP-телефонії треба забезпечити невелику затримку передавання голосових кадрів і невелику нерівномірність цієї затримки. В мережах IEEE 802.11 внаслідок спільного використання середовища передавання і конкурентного доступу до каналу за наявності великої кількості активних користувачів можуть виникати колізії, що призводить до зменшення пропускної здатності і погіршення інших показників

якості.

Відомі компанії-виробники мережного обладнання приділяють велику увагу удосконаленню технології VoIP. Так, компанія Cisco в постійно оновлюваних рекомендаціях щодо організації мереж з послугою VoIP [36] зазначає, що під час планування таких мереж треба надавати перевагу мережним технологіям, що призначені для використання в діапазоні 5 ГГц. Для забезпечення високої якості надання послуги VoIP треба забезпечити умови, за яких наскрізна затримка передавання голосового кадру не буде перевищувати 150 мс, а нерівномірність затримки (джитер) буде в межах 100 мс. Також зазначено, що треба забезпечити відношення сигнал-шум в точці приймання не менше 25 дБ, а навантаження мережі має не перевищувати 50%.

У роботі [37] наведено рекомендації, що ґрунтуються на наявному досвіді і теоретичних дослідженнях. Серед цих рекомендацій можна відзначити таке: для кадрів VoIP треба використовувати пріоритизацію з гарантованим доступом до каналу, а також застосовувати протокол реального часу (RTP).

У роботі [37] крім згаданих вище засобів підвищення якості обслуговування рекомендовано здійснювати керування пропускну здатністю каналу і уникати надмірного навантаження.

Наведені вище рекомендації сприяють поліпшенню якості послуги IP-телефонії, але не надають кількісної оцінки впливу окремих чинників. Наприклад, говорити про ефективну пропускну здатність безпроводової мережі неможливо без прив'язки до розмірів кадрів даних, які передають станції мережі. Потребує уточнення питання стосовно розподілу пропускну здатності мережі між трафіком з різними пріоритетами, а також питання щодо кількості активних станцій, які можуть одночасно функціонувати в зоні обслуговування точки доступу.

Метою дослідження є з'ясувати особливості передавання голосового трафіка для організації послуги IP-телефонії в офісних і подібних приміщеннях засобами мережі IEEE 802.11ac, щоб забезпечити якісне надання зазначеної послуги для достатньо великої кількості користувачів в зоні обслуговування

точки доступу, навіть за умови інтенсивного передавання змішаного трафіка в мережі.

4.2 Кодеки і особливості їх застосування

Перш, ніж перейти до розгляду процесів у безпроводовій мережі IEEE 802.11ac, необхідно з'ясувати параметри й характеристики голосового трафіка, який треба передавати мережею. У цифрових системах для передавання голосового трафіка застосовують стиснення сигнального потоку з метою зменшити його інтенсивність для передавання цифровими мережами. Голосовий потік після стиснення подають на каналному рівні кадрами однакової величини і однакової тривалості. Існує велика кількість голосових кодеків, що використовують у системах цифрового голосового зв'язку [66-68]. У табл. 4.1 за матеріалами [67] наведено параметри кількох кодеків, що мають застосування в IP-телефонії.

Таблиця 4.1 – Параметри деяких кодеків голосових сигналів

Параметри	G.711	G.729	G.722	iLBC
Тип	вузькосмуговий	вузькосмуговий	широкосмуговий	вузькосмуговий
Звукові частоти, Гц	300-3400	300-3400	50-7000	300-3400
Частота дискретизації, Гц	8000	8000	16000	8000
Розрядність	8	16	14	16
Потік, кбіт/с	64	8	48, 56, 64	13,33 – 15,2
Навантаження	160 байтів/20мс 240 байтів/30мс	20 байтів/20мс	160 байтів/20мс	38 байтів/20мс 50 байтів/30мс
Метрика MOS	4,1	3,9	4,3 (64 кбіт/с)	4,1 (15,2 кбіт/с)

Кодек G.711 – один із перших голосових кодексів, що був призначений

для застосування в каналах ISDN. Його часто використовують і в Інтернет-телефонії (VoIP).

G.729 – це кодек із малою інтенсивністю сигнального потоку і малим обсягом блоків даних корисного навантаження. Зниження якості відтвореного голосу є незначним, у порівнянні з кодеком G.711. У кодеку використано алгоритм стиснення з втратами. Цей кодек використовують у мережах з обмеженою пропускнуою здатністю, таких як WAN. Як і G.711, це один із найпоширеніших кодеків у сфері VoIP.

Кодек G.722 є широкосмуговим і забезпечує більш природне звучання голосу, в порівнянні з G.711 і G.729.

iLBC (Internet Low Bitrate Codec) – Інтернет-кодек з малою інтенсивністю сигнального потоку, що забезпечує чудову якість передавання голосу. В ньому передбачено деяку компенсацію втрачених голосових кадрів, що може статися внаслідок втрати або затримки IP-пакетів. Необхідне навантаження на процесор подібне до G.729. Кодек призначено для використання в Інтернеті в рамках протоколу WebRTC (real-time communications) для організації голосового і відео зв'язку.

Табл.4.1 містить інформацію про інтенсивність стислого потоку поширених аудіокодеків, що необхідно для оцінювання якості передавання голосового трафіка.

4.3 Розрахунок часу передавання голосових кадрів за різних режимів модуляції і кодування

Для дослідження особливостей передавання голосового трафіка в мережах IEEE 802.11ac скористаємось параметрами кодеку G.711, як одного із поширених кодеків для IP-телефонії і такого, що формує кадри даних з великим навантаженням (табл. 4.1).

Визначимо час передавання одного кадру голосового трафіка, сформованого кодеком G.711. Розглянемо час передавання в каналі

IEEE 802.11ac з частотною смугою 20 МГц у режимі з одним просторовим потоком, в разі застосування різних схем модуляції і кодування (MSC). Розглянемо два режими функціонування кодеку G.711: з тривалістю вибірки 20 мс і з тривалістю вибірки 30 мс. Для розрахунку часу передавання голосового кадру скористаємось розподілом часових інтервалів, наведених на рис. 1.4.

Тривалість інтервалу передавання голосового кадру $E[T_{PL1}]$ визначимо за співвідношенням, що впливає безпосередньо з розподілу часових інтервалів на рис. 1.4.

$$E[T_{PL1}] = AIFS + CW + T_{RST} + SIFS + T_{CST} + SIFS + T_{MPDU} + SIFS + T_{ACK}, \quad (4.1)$$

де $AIFS$ – міжкадровий арбітражний інтервал, CW – тривалість затримки, обумовленої лічильником зворотного відліку, T_{RTS} – кадр запиту на передавання, $SIFS$ – короткий міжкадровий інтервал, T_{CTS} – кадр підтвердження готовності прийняти кадр, T_{MPDU} – тривалість кадру даних, яким передають блок голосової інформації разом зі службовою інформацією протоколів верхніх рівнів моделі OSI, рис. 4.2 [69], T_{ACK} – кадр підтвердження прийнятого кадру даних.

IP 20 байтів	UDP 8 байтів	RTP 12 байтів	Голосові дані, n байтів	FCS 4 байти
-----------------	-----------------	------------------	----------------------------	----------------

Рисунок 4.2 – Структура даних в кадрі корисного навантаження (Data)

Для аналізу особливостей передавання голосового трафіка розглянемо кілька режимів доступу до середовища передавання. Розглянемо режим передавання голосового трафіка в мережі DCF без пріоритизації і режим передавання голосового трафіка з пріоритизацією в мережі EDCF. Ці режими вибрано для досліджень, оскільки різні виробники мережного обладнання пропонують по-різному реалізовувати послугу передавання голосового трафіка [2, 70].

Для кращої надійності приймання службової інформації і кращої електромагнітної сумісності близько розташованих мереж стандарту IEEE 802.11 преамбули кадрів на каналному рівні передають з малою кратністю модуляції і з найменшою швидкістю протизавадного коду ($CR=1/2$). Для передавання преамбули, сумісної з попередніми технологіями IEEE 802.11 застосовують режим MCS0 зі швидкістю передавання 6 Мб/с. Визначимо тривалості часових інтервалів, наведених на рис. 1.4. Як було зазначено вище, угруповання OFDM, яке передбачено застосовувати в каналі з частотною смугою 20 МГц, містить 56 частот, 52 із яких передбачено для передавання даних, а 4 – для передавання пілот-сигналів. Тривалість символу 3,6 мкс використовують для передавання частини преамбули дуже швидкісного режиму (VHT) і даних в однорідних мережах, що підтримують режим VHT. Надалі будемо вважати, що для передавання голосового трафіка використовуємо символи OFDM тривалістю 4 мкс. Важливі системні параметри режимів DCF і EDCF наведено в табл. 1.2.

Тривалості міжкадрових інтервалів, протягом яких станції мережі не здійснюють дій для доступу до каналу, мають такі значення: $SIFS = 16$ мкс (короткий міжкадровий інтервал), $DIFS = 34$ мкс, $AIFS[AC_BE] = SIFS + 3 \cdot ST = 16 + 3 \cdot 9 = 43$ мкс, $AIFS[AC_VO] = SIFS + 2 \cdot ST = 16 + 2 \cdot 9 = 34$ мкс, $AIFS[AC_BK] = SIFS + 7 \cdot ST = 16 + 7 \cdot 9 = 79$ мкс, табл. 1.2.

У мережі DCF та у мережі EDCF для класів доступу BE і BK значення конкурентного вікна однакові та знаходяться в межах від $CW_{min} = 15$ до $CW_{max} = 1023$. Якщо одна активна станція мережі буде тривалий час передавати голосовий трафік у мережі DCF без конкуренції з боку інших станцій, тоді в середньому затримка зворотного відліку становитиме $CW = CW_{min}/2 = 7,5$ (часових слотів).

Тривалість кадрів RTS і CTS визначено в розділі 2 і становить по 28 мкс.

Визначимо тепер тривалість інтервалу передавання блоку даних, сформованого кодеком G.711, рис.4.2.

Інтенсивність потоку на виході кодека становить 64 кбіт/с, табл. 4.1. IP-

мережами передають інформаційні пакети цього кодека двох типів: пакети з вибіркою 20 мс голосового сигналу і пакети з вибіркою 30 мс. Кодек G.711 формує сигнал за методом ІКМ (імпульсно-кодової модуляції) з частотою відліків 8 кГц, розрядністю оцифрованого відліку 8 біт/відлік і можливістю компандирування сигналу. Під час оброблення вибірки звукового сигналу тривалістю 20 мс кодер сформує блок даних, що містить 160 відліків. Окрім безпосередньо голосових даних блок даних містить 20 байтів заголовку IP, 8 байтів заголовку UDP і 12 байтів заголовку RTP, тобто разом іще 40 байтів даних, рис.4.2. Сумарно блок даних має обсяг $160 + 40 = 200$ байтів, що дорівнює 1600 бітів.

Проаналізуємо деякі чинники, що впливають на процес передавання даних. Відстань, на якій можна здійснювати передавання даних між абонентською станцією і точкою доступу залежить від потужності передавача і схеми модуляції і кодування радіочастотних сигналів. Найбільшу швидкість передавання в каналі з частотною смугою 20 МГц в режимі MCS8 можна реалізувати на найменшій відстані від точки доступу. У той же час деякі користувачі можуть знаходитись на значній відстані від точки доступу і тому режим передавання даних буде повільнішим ніж у разі застосування MCS8.

Крім відстані на режим передавання впливають різні перешкоди, що знаходяться на шляху розповсюдження електромагнітних хвиль. В офісних приміщеннях це можуть бути перегородки із різноманітних матеріалів, стелажі, інші співробітники тощо. Для оцінювання того, наскільки зміняться умови передавання голосового трафіка, в разі використання меншої швидкості для передавання даних, визначимо час передавання голосового кадру, в разі застосування різних схем модуляції і кодування (MCS3 – MCS8). Для прикладу наводимо розрахунок для режиму MCS8 – найбільш швидкісного режиму для каналу 20 МГц мережі 802.11 ас з одним просторовим потоком.

У режимі з MCS8 застосовують модуляцію 256-QAM і швидкість протизавадного коду $CR=3/4$. Після протизавадного кодування обсяг даних росте

до $1600 \cdot 4 : 3 = 2134$ бітів. Одним OFDM символом можна передати $8 \text{ бітів} \cdot 52 = 416$ бітів. Для передавання всього блоку даних знадобиться $2134 : 416 = 5,13 \rightarrow 6$ символів або 24 мс. Час передавання кадру даних з урахуванням преамбули (44 мкс) становитиме $44 + 24 = 68$ (мкс).

Згідно з (4.1), загальна тривалість циклу доступу до каналу для передавання блоку голосової інформації тривалістю 20 мс в мережі DCF складе:

$$E[T_{PL1}] = 34 + 7,5 \cdot 9 + 28 + 16 + 28 + 16 + 68 + 16 + 32 = 305,5 \text{ мкс.}$$

Результати розрахунків тривалості циклу доступу до каналу для передавання одного голосового кадру, в разі застосування різних режимів модуляції та кодування (MCS), наведено в табл. 4.2 та у вигляді графічної залежності на рис. 4.3 [71].

Таблиця 4.2 – Тривалість циклу передавання голосового кадру в мережі DCF

MCS	3	4	5	6	7	8
T_{K20} , мкс	345,5	325,5	313,5	309,5	309,5	305,5
T_{K30} , мкс	369,5	341,5	325,5	321,5	317,5	313,5

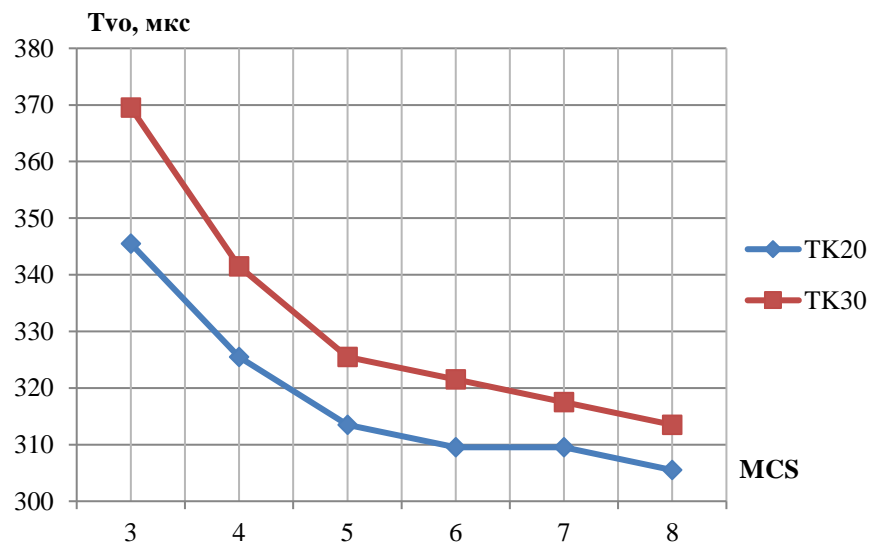


Рисунок 4.3 – Залежність тривалості T_{VO} передавання голосового кадру від режиму модуляції і кодування MCS

На рис. 4.3 наведено результати розрахунків часу передавання голосових кадрів з вибіркою 20 мс та 30 мс.

Якщо тільки одна станція в мережі передає голосовий трафік без агрегування, то вона рівномірно передаватиме 50 кадрів за секунду, в разі опрацювання звукових фрагментів (вибірок) тривалістю 20 мс і 33,3(3) кадри – в разі опрацювання фрагментів тривалістю 30 мс.

Якщо порівняти час формування звукового кадру і тривалість інтервалу доступу до каналу для його передавання, то очевидно, що час передавання складає незначну частку від часу формування звукового кадру. Так, в разі передавання кадру з вибіркою 20 мс, час передавання становить $1,72 \div 1,53\%$ часу вибірки в разі застосування режимів MCS3-MCS8 відповідно, а для кадру з вибіркою 30 мс – $1,23 \div 1,04\%$.

Із отриманих результатів, рис. 4.3, випливає, що час передавання кадру даних, що містить голосову інформацію мало залежить від режиму модуляції й кодування. Тривалість циклу передавання стислого кадру з вибіркою 20 мс знаходиться в межах $305 \div 345$ мкс, а з вибіркою 30 мс – $313 \div 369$ мкс. Тобто, умови передавання голосового трафіка для станцій, що знаходяться на різній відстані від точки доступу, будуть майже однаковими.

Можна визначити теоретичну межу кількості активних станцій, які могли б функціонувати в зоні обслуговування однієї точки доступу. Максимальну кількість активних станцій визначимо як частку від ділення тривалості вибірки на тривалість циклу передавання стислого кадру. За ідеального узгодження активних станцій в часі у мережі 802.11ac з каналом 20 МГц одночасно могли б функціонувати без взаємних завад 57 станцій, в яких кодеки працюють з вибірками 20 мс або 81 станцій, що формують звукові кадри з вибірками по 30 мс. Можна також прогнозувати, що в разі застосування агрегування кадрів окремого абонента і узгодження в часі всіх абонентів кількість одночасно активних станцій можна збільшити.

4.4 Передавання голосового трафіка в мережах зі змішаним навантаженням

За реальних умов голосовий трафік передають в мережах, в яких за доступ до середовища передавання конкурують різні станції, які можуть передавати як голосові кадри, так і кадри, що містять іншу інформацію.

Розглянемо особливості функціонування мережі, в якій є кілька станцій з насиченим навантаженням (буфер даних постійно заповнений), що передають дані з низьким пріоритетом, і кілька станцій, що передають голосову інформацію.

Розглянемо режим, коли в мережі є M станцій, що передають голосові дані, і N станцій з насиченим навантаженням. Режим насиченого навантаження використовуємо для визначення граничних можливостей мережі [26, 72].

Проаналізуємо сценарій, за якого насичене навантаження віднесено до класу AC_BK (низький пріоритет), а голосові дані мають пріоритет AC_VO, табл. 1.2. Розподіл часових інтервалів в безпроводовому каналі буде таким, як наведено на рис. 4.4.

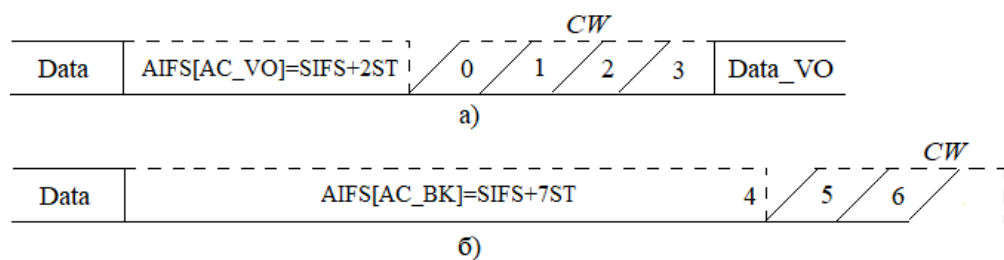


Рисунок 4.4 – Розподіл часових інтервалів у мережі з гібридним пріоритизованим навантаженням

Після звільнення радіочастотного каналу (завершення циклу передавання кадру даних) станції VO витримують паузу, обумовлену арбітражним міжкадровим інтервалом $SIFS+2ST$, а станції BK – інтервалом $SIFS+7ST$. Тобто, станції VO мають інтервал тривалістю п'ять часових слотів (ST), щоб передати свої кадри без конкуренції з кадрами BK. П'ятий інтервал може бути

використаний, в разі виникнення колізії між станціями VO.

Також треба взяти до уваги, що в лічильник зворотного відліку станція VO завантажить число із множини $[0, 1, 2, 3]$. Тобто, передавання VO кадру почнеться ще до того, як закінчиться арбітражний інтервал для ВК станції.

Особливістю передавання голосового трафіка є те, що він не створює насиченого навантаження. Станція передає стислу звукову інформацію з періодичністю 20 мс, якщо не застосовано механізм агрегування кадрів, а в разі агрегування – через більші проміжки часу, кратні 20 мс.

Тепер треба оцінити, скільки буде міжкадрових інтервалів, протягом яких станції VO мають змогу передавати кадри без конкуренції зі станціями ВК. Зробимо розрахунок для випадку, коли кадри ВК мають навантаження 1500 байтів, що характерно для великих кадрів даних, які надходять через мережу Ethernet. Саме такі кадри характерні для локальних мереж як «великі кадри» [3].

Розглядаємо великі кадри, оскільки вони потребують для передавання більше часу і створюють гірші умови для передавання голосового трафіка. Розглянемо сценарій, за якого в мережі є одна станція з насиченим навантаженням передає великі кадри. Оскільки станція з насиченим навантаженням може знаходитись на різній відстані від точки доступу, це призведе до того, що для передавання її кадрів буде застосовано різні параметри модуляції і кодування залежно від відстані. В межах нашого дослідження розглянемо три режими: режим MCS3 для станцій, що знаходяться на великій відстані від точки доступу або для них приймання/передавання сигналу ускладнено з інших причин; режим MCS5 для станцій, що знаходяться на середній відстані, і режим MCS8 для станцій, що знаходяться поблизу точки доступу. В мережі з кількома станціями з насиченим навантаженням усереднена кількість «порожніх» часових слотів зменшується, а крім того виникають колізії, що призводить до збільшення кількості міжкадрових інтервалів порівняно з розглянутим вище сценарієм з однією станцією з насиченим навантаженням, а значить і умови для передавання кадрів VO, будуть більш сприятливими.

Якщо кадри даних з пріоритетом ВК міститимуть по 1500 байтів корисної

інформації, то за умови передавання даних у режимі MCS3 (16-QAM, $CR=3/4$) і з урахуванням тривалості арбітражного інтервалу (79 мкс), а також з урахуванням усередненої затримки, обумовленої лічильником зворотного відліку, тривалість циклу доступу до каналу для передавання цих кадрів становитиме 802,5 мкс. У режимі MCS5 (64-QAM, $CR=2/3$) тривалість циклу становитиме 570,5 мкс, а в режимі MCS8 (256-QAM, $CR=3/4$) – 496,5 мкс.

При розрахунку тривалості циклів доступу із застосуванням різних систем модуляції і кодування (MCS) враховані такі тривалості часових інтервалів: $T_{CW}=9\cdot7,5=67,5$ (мкс); $T_{SIFS}=16$ мкс; $T_{RTS}=T_{CTS}=28$ мкс; $T_{ACK}=32$ мкс.

Протягом 20 мс, у разі передавання низькопріоритетного насиченого трафіка виникне щонайменше 24,92 (≈ 25) арбітражних інтервали у разі застосування MCS3, в кожному з яких є чотири часові слоти, де кадри з голосовими даними можуть конкурувати тільки між собою. В разі застосування системи модуляції і кодування MCS5 протягом 20 мс буде 35,06 арбітражних інтервали, а в разі MCS8 – 40,28 арбітражних інтервали.

Розглянемо, як буде передано голосові кадри, якщо в мережі активними є M станцій, що передають голосовий трафік.

Всі M станцій є незалежними, і кожна намагається отримати доступ до мережі під час випадково обраного арбітражного інтервалу і часового слоту після відліку випадкового числа (CW) лічильником зворотного відліку.

Якщо врахувати 25 арбітражні інтервали, наявні протягом 20 мс, і в кожному інтервалі по 4 часові слоти, які випадковим чином може обрати станція, то для початку циклу передавання M голосових кадрів є не менше 100 можливих реалізацій. Позначимо літерою K загальну кількість можливих реалізацій, коли станції VO можуть розпочати передавання. Це моменти часу, під час яких конкурувати за доступ до каналу будуть тільки станції VO.

Оцінимо ймовірність виникнення колізій між M станціями VO, що конкурують за доступ до каналу протягом 20 мс. Схоже завдання було вирішене в [26], і запропоновано співвідношення для визначення ймовірності виникнення колізії. В зазначеній роботі отримано оцінку ймовірності колізій в мережі з

насиченим навантаженням в разі застосування конкурентного вікна певної величини.

Хоча в нашому дослідженні станції не формують насичене навантаження як це мало місце в [26], але схожість завдання полягає в необхідності визначити ймовірність того, що дві або більше станцій виберуть випадковим чином однакові часові інтервали із певної доступної множини.

Визначимо ймовірність виникнення колізій між M станціями VO як відношення кількості сприятливих подій до загальної кількості можливих подій. З урахуванням зроблених вище позначень, це співвідношення набуде вигляду:

$$P_c = \frac{\tilde{A}_K^M - A_K^M}{\tilde{A}_K^M} = 1 - \frac{K!}{(K-M)!K^M}, \quad (4.2)$$

де $\tilde{A}_K^M = K^M$ – кількості розміщень із K по M з повторами, $A_K^M = \frac{K!}{(K-M)!}$ –

кількості розміщень із K по M без повторів.

Результати розрахунку ймовірності виникнення колізій для станцій VO під час першої спроби отримати доступ до каналу наведено на рис. 4.5. Розраховано ймовірність колізій для трьох режимів передавання низькопріоритетного трафіка: для режиму MCS3 ($K=100$), для режиму MCS5 ($K=140$), для режиму MCS8 ($K=161$). Тобто для подальшого аналізу отримано оцінку щодо ймовірності колізії для найменшої швидкості передавання даних, для середньої швидкості і для найбільшої швидкості, передбаченої для каналу з шириною частотної смуги 20 МГц.

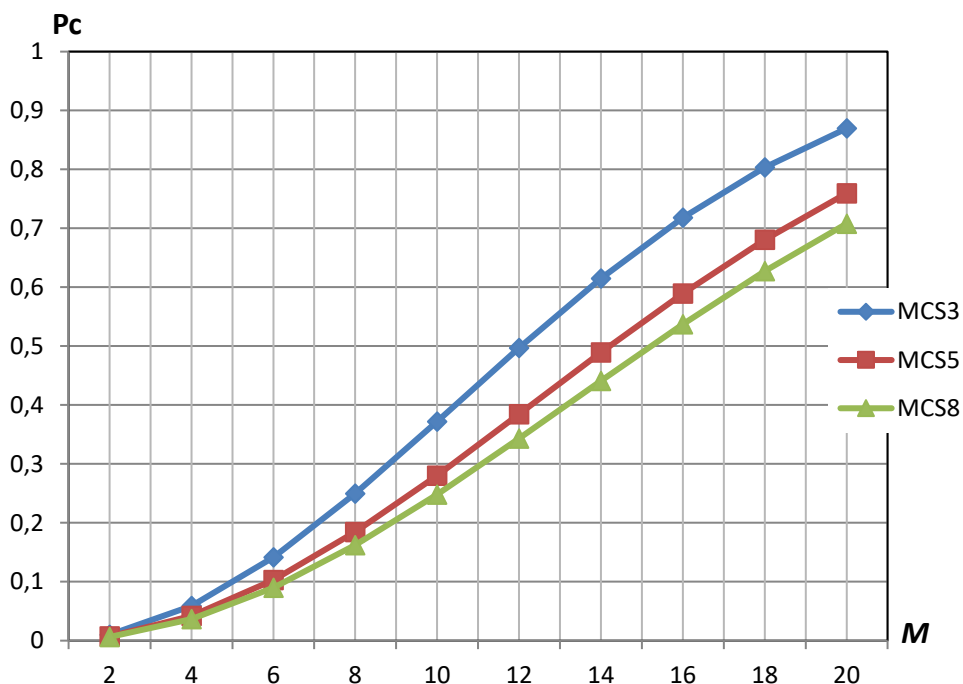


Рисунок 4.5 – Ймовірність виникнення колізій в мережі IEEE 802.11ac з M станціями AC_VO і насиченим трафіком AC_BK

Обговорення результатів

Безпосередньо із графіків, наведених на рис. 4.5, випливає, що за наявності в мережі IEEE 802.11ac станцій, що передають низькопріоритетний трафік класу AC_BK, навіть за умови насиченого навантаження можливе одночасне функціонування великої кількості станцій, що передають голосовий трафік. Так, за наявності в мережі одночасно десяти активних станцій з голосовим трафіком, ймовірність виникнення колізій за наявності в мережі станцій з насиченим навантаженням, що знаходяться на малих і середніх відстанях від точки доступу (MCS5, MCS8), становить не більше 0,3. Це означає, що колізія між станціями AC_VO буде виникати в середньому один раз на три цикли по 20 мс. У разі наявності п'ятнадцяти активних станцій AC_VO ймовірність колізії становить приблизно 0,5 і колізія буде в середньому виникати один раз на два цикли по 20 мс. Станції, що потрапили в колізію, швидко її подолують із застосуванням стандартного механізму, оскільки всі

інші станції, що успішно передали свої голосові кадри з першої спроби не будуть створювати конкуренції за користування каналом.

У разі зменшення часу передавання кадрів низькопріоритетного трафіка, ймовірність виникнення колізій для станцій AC_VO зменшується, внаслідок збільшення кількості арбітражних інтервалів і збільшення кількості інтервалів, коли голосові кадри передають без конкуренції з низькопріоритетним трафіком. У нашому дослідженні розглянутий сценарій, за якого для низькопріоритетного трафіка використано великі кадри даних (1500 байтів), але в реальних офісних мережах трафік складається із кадрів даних різного розміру зі значною часткою невеликих кадрів даних [71], що сприяє поліпшенню умов для передавання трафіка класу AC_VO.

Також можна відзначити, що виникнення колізій між станціями з низькопріоритетним трафіком практично не призводить до збільшення затримки передавання і нерівномірності затримки голосових кадрів, оскільки колізії відбуваються в інтервалах передавання кадрів *RTS*. Тобто, станції з кадрами AC_VO отримують доступ до середовища передавання одразу після колізійного інтервалу.

Оскільки збільшення конкурентного вікна для голосових кадрів в разі виникнення колізії відбувається тільки в два рази, табл. 1.2 (з $CW_{\max} = 3$ до $CW_{\max}=7$) затримка передавання голосового кадру в розглянутій мережі IEEE 802.11ac не перевищуватиме кількох спроб доступу до каналу. Тобто не перевищуватиме кількох мілісекунд. Це ж стосується і нерівномірності затримки, що обумовлено технологією доступу до каналу (зворотний відлік часових слотів) і часом подолання колізії, в разі її виникнення (можливе виникнення інтервала очікування під час передавання кадру низькопріоритетного трафіка).

Окремо треба зауважити, що для зони обслуговування однієї точки доступу мережі IEEE 802.11ac наявність одночасно активних 15-20 станцій, що передають голосовий трафік, є доволі малою ймовірною, оскільки ці мережі призначено для використання в приміщеннях, і радіус зони обслуговування є

відносно невеликим (до кількох десятків метрів [61]). Тому, застосування безпроводової мережі IEEE 802.11ac для організації IP-телефонії в офісних і подібних приміщеннях може бути ефективним технічним рішенням. Для обслуговування великих приміщень і забезпечення мобільності співробітників треба застосовувати безшовний роумінг між зонами обслуговування кількох точок доступу.

4.5 Характеристики мережі в режимі «найкраща спроба»

Розглянемо сценарій функціонування мережі, за якого в мережі передають трафік з двома пріоритетами: голосовий трафік з пріоритетом VO і весь інший трафік з пріоритетом BE, табл.1.2. Діаграму розподілу часових інтервалів такого режиму функціонування мережі наведено на рис.4.6.

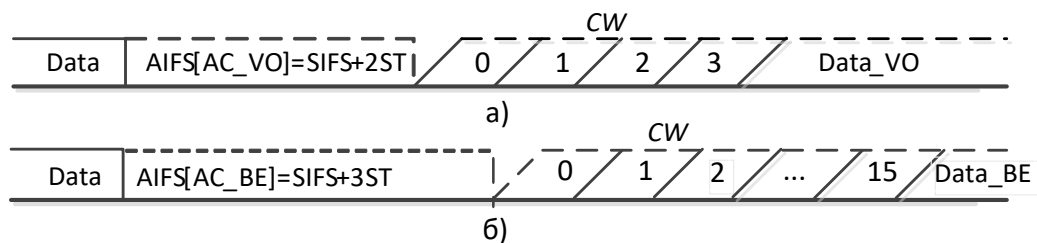


Рисунок 4.6 – Розподіл часових інтервалів у конкурентному вікні між кадрами VO і BE

Можна виділити такі особливості передавання кадрів голосового трафіку:

- в кожному циклі доступу є один часовий слот, в якому за доступ до каналу конкурують тільки станції з голосовим трафіком (VO);
- станції з голосовим трафіком не створюють насиченого навантаження, вони формують один кадр голосових даних з певною періодичністю (наприклад 20 мс) і починають спробу передавання кадру з випадкового моменту часу;
- в разі потрапляння в колізію станція з голосовим трафіком збільшує конкурентне вікно один раз і починає завантажувати в лічильник зворотного відліку число із множини $[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]$, що в два рази менше початкової множини $[0, 1, 2, \dots, 14, 15]$ для кадрів з пріоритетом BE, табл.1.2.

У разі наявності в мережі кількох активних станцій, що передають

голосовий трафік, частина цих станцій отримає пріоритетний доступ до каналу, якщо установить в лічильник число «0», внаслідок більш короткого арбітражного інтервалу AIFS_VO, а частина буде конкурувати зі станціями BE.

Проаналізуємо особливості передавання голосових кадрів за таких умов.

Під час першої спроби доступу до каналу станції VO завантажують лічильник зворотного відліку числом із множини $[0, 1, 2, 3]$ шляхом його вибору за випадковим законом. Тобто ймовірність вибору будь-якого числа із зазначеної множини i , зокрема, «0» становить 0,25. В разі, коли в мережі функціонує одночасно кілька станцій, що передають голосовий трафік, у середньому чверть цих станцій отримають доступ до каналу зразу після завершення арбітражного інтервалу AIFS_VO і між ними можуть виникнути колізії. Але слід підкреслити, що ці колізії можуть бути тільки між станціями VO.

Для оцінювання можливих колізій для таких станцій зробимо розрахунок з використанням уже наявних даних, отриманих під час дослідження пропускну здатності безпроводового каналу.

Оскільки періодичність передавання голосових кадрів становить 20 мс визначимо скільки «нульових слотів» буде мати місце за цей час. «Нульові часові слоти» – це слоти під час яких цикл доступу до каналу починають станції VO, що завантажили в лічильник зворотного відліку число $CW = 0$. Розглянемо найменш сприятливий варіант, коли інші станції мережі передають кадри з навантаженням 1500 байтів з пріоритетом BE в насиченому режимі. Інтервал AIFS_VO буде виникати після кожного успішно переданого кадру, а також після кожної колізії.

Спочатку визначимо ймовірність колізії для кадрів VO, що починають доступ до каналу в нульовому слоті.

Для вирішення завдання щодо визначення ймовірності колізій під час нульових слотів треба з'ясувати:

- скільки буде нульових слотів протягом 20 мс;
- яку загальну кількість слотів буде відраховано за 20 мс;

– яка ймовірність колізій буде мати місце для голосових кадрів, переданих в нульовому слоті.

«Нульові слоти» будуть виникати безпосередньо після арбітражного інтервалу, відрахованого після кадру підтвердження (АСК або ВА) про успішне передавання будь-якого кадру даних будь-якою станцією мережі або після такого інтервалу, відрахованого після завершення колізії.

На підставі зробленого зауваження можна запропонувати співвідношення для визначення кількості «нульових слотів» (кількості арбітражних інтервалів) N_{int} протягом певного інтервалу часу:

$$N_{\text{int}} = \frac{T_1}{T_{\text{VCW}}} \cdot (N_s + N_c), \quad (4.3)$$

де T_1 – тривалість досліджуваного інтервалу (20 мс); T_{VCW} – час реалізації віртуального конкурентного вікна; N_s , N_c – кількість успішно переданих кадрів і кількість колізій, що відбулась протягом віртуального конкурентного вікна відповідно.

Як і раніше будемо розглядати мережу, в якій кожна активна станція з пріоритетом ВЕ має насичене навантаження, а кількість активних станцій змінюється від 2 до 16. Вважаємо, що кількість одночасно активних станцій з голосовим трафіком може бути від 2 до M .

Для обчислення величини N_{int} скористаємось даними, наведеними в табл. 2.1 (T_{VCW} , N_c) і табл. А.7 (N_s).

Результати розрахунку за формулою (4.3) кількості арбітражних інтервалів, утворених в мережі IEEE 802.11ac з шириною частотної смуги 20 МГц з насиченим навантаженням кадрами даних 512 або 1500 байтів та початкові дані для розрахунків наведено в табл. 4.2.

Усього маємо M станцій з голосовим трафіком (VO). В середньому під час «нульових слотів» будуть передавати $m = M/4$ таких станцій. Ймовірність того, що одна із m станцій VO почне передавати під час певного «нульового слоту» становить $1/N_{\text{int}}$. Ймовірність того, що дана станція не почне передавати під час якогось конкретного нульового часового слоту становитиме $(1 - 1/N_{\text{int}})$.

Якщо протягом інтервалу 20 мс будуть передавати і інші станції VO, то ймовірність того, що жодна із $(m-1)$ станцій не почне передавати в тому нульовому слоті, в якому передає перша станція становитиме $(1-1/N_{\text{int}})^{(m-1)}$.

Таблиця 4.2 – Приблизна кількість арбітражних інтервалів N_{int}^{512} та N_{int}^{1500} , наявних в мережі зі змішаним трафіком протягом 20 мс

N	N_s	N_c	T_{VCW}^{512}	T_{VCW}^{1500}	N_{int}^{512}	N_{int}^{1500}
2	2	0,066667	605,2545	785,2544	68	52
4	3,999979	0,427256	1169,764	1529,722	75	57
6	5,999272	1,142386	1763,176	2302,24	81	62
8	7,993291	2,282442	2390,852	3104,312	85	66
10	9,968072	3,925061	3056,364	3930,445	90	70
12	11,8948	6,148615	3761,613	4768,249	95	75
14	13,7333	9,023238	4507,34	5600,975	100	81
16	15,43527	12,60204	5293,491	6410,825	105	87

Примітка. N_{int}^{512} та N_{int}^{1500} – кількість арбітражних інтервалів, що виникають в мережах з насиченим навантаженням з обсягом корисних даних в кадрі 512 та 1500 байтів відповідно.

Наведені міркування дозволяють сформулювати оцінку ймовірності успішного передавання (без жодної колізії) P_{s0} для кадрів тих станцій мережі, що завантажують в лічильник зворотного відліку число 0. Для цієї ймовірності можна записати

$$P_{s0} = (1 - 1/N_{\text{int}})^{m-1}. \quad (4.3)$$

Числові значення, отримані за формулою (4.3) наведено в табл.4.3.

Графік залежності ймовірності успішного передавання (без колізій, з першої спроби) під час нульових слотів наведено на рис. 4.7.

Визначимо тепер ймовірність успішного передавання голосових кадрів для станцій, що на початку першої спроби доступу до каналу завантажили в лічильник зворотного відліку число із множини [1, 2, 3]. Ці станції будуть

конкурувати зі станціями ВЕ з насиченим навантаженням, а також можуть конкурувати між собою.

Таблиця 4.3 – Значення ймовірності передати кадр VO в нульовому слоті

N_{BE}	N_{int}^{1500}	m				N_{int}^{512}	m			
		2	4	6	8		2	4	6	8
2	52	0,980	0,943	0,907	0,872	68	0,985	0,956	0,928	0,901
4	57	0,982	0,948	0,915	0,883	75	0,986	0,960	0,935	0,910
6	62	0,983	0,952	0,921	0,892	81	0,987	0,963	0,939	0,916
8	66	0,984	0,955	0,926	0,898	85	0,988	0,965	0,942	0,920
10	70	0,985	0,957	0,930	0,904	90	0,988	0,967	0,945	0,924
12	75	0,986	0,960	0,935	0,910	95	0,989	0,968	0,948	0,928
14	81	0,987	0,963	0,939	0,916	100	0,990	0,970	0,950	0,932
16	87	0,988	0,965	0,943	0,922	105	0,990	0,971	0,953	0,935

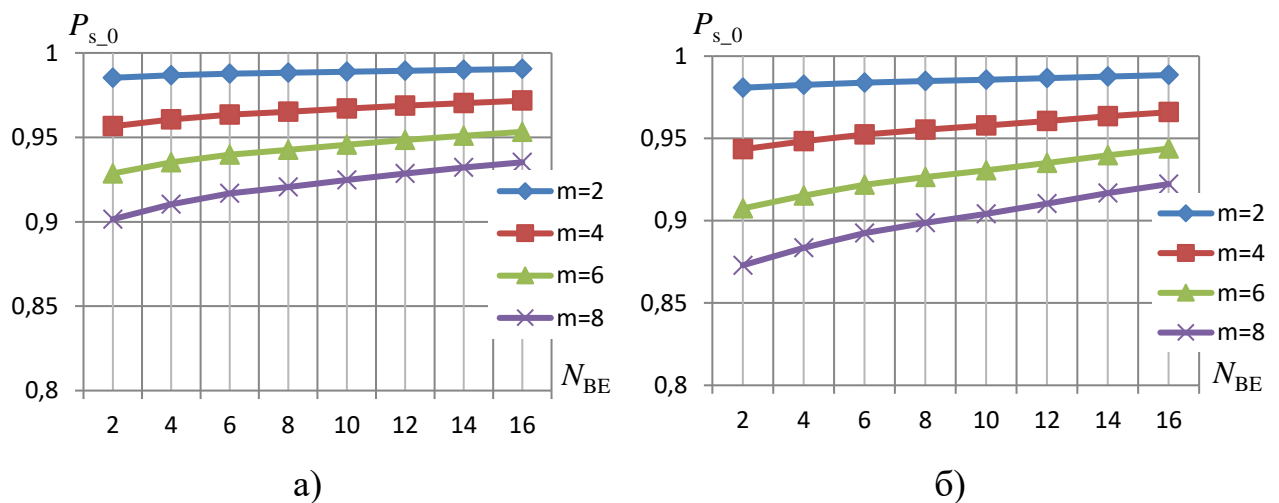


Рисунок 4.7 – Ймовірність передавання кадру VO в змішаній мережі з кількома станціями з голосовим трафіком і кількома насиченими станціями: а – корисне навантаження пакетів 512 байтів; б – 1500 байтів

Оскільки станції VO не генерують насиченого навантаження і з урахуванням того, що станції, які передають голосовий трафік починають боротись за доступ до каналу у випадковий момент часу, то ймовірність

конкуренції між цими станціями у разі їх невеликої кількості є малою.

Як було зазначено вище під час розрахунку характеристик голосового трафіку, кількість голосових кадрів, які можна передати в однорідній мережі протягом 20 мс без колізій в разі узгодженої в часі роботи станцій, становить приблизно 57 (для кодера G.711 з інтервалом вибірки 20 мс), що з практичних міркувань перевищує можливу кількість станцій з голосовим трафіком одночасно активних в зоні обслуговування однієї точки доступу IEEE802.11ac.

Розглянемо особливості передавання голосових кадрів за умов конкуренції з кадрами насиченого трафіку BE. Ймовірність того, що станція з голосовим трафіком, яка випадковим чином починає доступ до каналу, саме за таких умов становитиме 0,75. Тобто із загальної кількості станцій з голосовим трафіком конкурувати зі станціями BE і між собою буде в середньому три чверті таких станцій.

Відзначимо особливість організації голосового з'єднання в мережах IEEE802.11. За такого з'єднання використовують і висхідний канал (від абонентських станцій до точки доступу), і низхідний канал (від точки доступу до абонентських станцій). Особливістю є те, що абонентські станції можуть намагатись передавати свої кадри одночасно і тим самим збільшувати загрозу колізій. Точка доступу передає всі кадри голосових з'єднань послідовно чим зменшує ймовірність колізії. Всі кадри голосових з'єднань, які передає точка доступу упорядковані в чергу і будуть передані по черзі один за іншим.

Щоб оцінити ймовірність передавання голосового кадру в разі наявності однієї активної станції VO в змішаній мережі знайдемо відносну частку вільних часових слотів в загальній кількості часових слотів, що мали місце протягом 20 мс.

Згідно з концепцією віртуального конкурентного вікна в мережі з насиченим навантаженням кількість вільних часових слотів протягом інтервалу реалізації цього вікна T_{VCW} дорівнює безпосередньо величині цього вікна (VCW). На підставі зазначеного можна записати, що кількість вільних часових слотів Q протягом довільного часового інтервалу T_1 буде дорівнювати

$$Q = \frac{T_1}{T_{VCW}} \cdot VCW. \quad (4.4)$$

Результат розрахунку усередненої кількості вільних часових слотів, які будуть мати місце протягом 20 мс для двох мереж з насиченим навантаженням, в одній з яких кадри містять по 512 байтів корисного навантаження, а в іншій – по 1500 байтів, наведено в табл. 4.4 – Q_1 і Q_2 відповідно.

Таблиця 4.4 – Кількість вільних часових слотів в інтервалі 20 мс для передавання голосових кадрів в мережі з насиченим навантаженням

N	2	4	6	8	10	12	14	16
VCW	8,036	9,519	11,772	14,905	18,779	23,067	27,367	31,307
$T_{VCW}^{512}, \mu s$	605,2	1169,7	1763,1	2390,8	3056,3	3761,6	4507,3	5293,4
Q_1	265,5	162,7	133,5	124,6	122,8	122,6	121,4	118,2
$T_{VCW}^{1500}, \mu s$	785,2	1529,7	2302,2	3104,3	3930,4	4768,2	5600,9	6410,8
Q_2	204,6	124,4	102,2	96,0	95,5	96,7	96,7	97,6
$N_{s_20_512}$	66,08	68,38	68,05	66,86	65,22	63,24	60,93	58,31
$N_{s_20_1500}$	50,94	52,29	52,11	51,49	50,72	49,89	49,03	48,15

В табл. 4.4 також наведено загальну кількість кадрів насиченого навантаження $N_{s_20_512}$ і $N_{s_20_1500}$ успішно переданих протягом 20 мс.

Загальну кількість часових слотів Q_0 наявних протягом 20 мс знайдемо, як суму часових слотів, під час яких розпочиналося успішне передавання кадрів N_s , слотів, під час яких виникали колізії N_c і вільних слотів VCW :

$$Q_0 = \frac{T_1}{T_{VCW}} \cdot (N_s + N_c + VCW). \quad (4.5)$$

Ймовірність передати кадр даних p_{1_512} та p_{1_1500} для станцій VO під час першої спроби в режимі конкуренції зі станціями BE з насиченим

навантаженням, кадри яких містять 512 або 1500 байтів, знайдемо зі співвідношень

$$p_{1_512} = \frac{Q_1}{Q_0} \text{ та } p_{1_1500} = \frac{Q_2}{Q_0}. \quad (4.6)$$

Числові значення ймовірностей p_{1_512} і p_{1_1500} наведено в табл. 4.5, а графічні залежності на рис 4.8.

Таблиця 4.5 – Ймовірності передавання голосового кадру в режимі конкуренції з насиченими станціями ВЕ

N_{BE}	2	4	6	8	10	12	14	16
Q_{0_512}	333,83	238,44	214,54	210,64	213,79	218,57	222,41	224,21
p_{1_512}	0,795	0,682	0,622	0,591	0,574	0,561	0,545	0,527
Q_{0_1500}	257,32	182,33	164,31	162,23	166,25	172,43	178,98	185,13
p_{1_1500}	0,795	0,682	0,622	0,591	0,574	0,561	0,545	0,527
p_{c_VO}	0,205	0,318	0,378	0,409	0,426	0,439	0,455	0,473
P_{S_VO}	0,9999	0,9989	0,9971	0,9954	0,9941	0,9929	0,9912	0,9889

Як впливає із отриманих даних ймовірність передати голосовий кадр станцією VO з першої спроби в режимі конкуренції з насиченими станціями ВЕ є однаковою для мереж, в яких станції ВЕ передають кадри з обсягом корисних даних 512 байтів (p_{1_512}) та 1500 байтів (p_{1_1500}), що обумовлено принципами формування часових інтервалів та правилами конкурентного доступу до середовища передавання.

Таким чином в змішаній мережі ймовірність успішного передавання з першої спроби одного голосового кадру в режимі конкуренції з насиченими станціями ВЕ знаходиться в межах від 0,795 (2 станції ВЕ і 1 станція VO) до 0,527 (16 станцій ВЕ і 1 станція VO).

У разі виникнення колізії під час першої спроби станція з голосовим трафіком збільшить своє конкурентне вікно (CW) в два рази і буде робити

повторні спроби передати голосовий кадр.

Передавання одного додаткового (голосового) кадру протягом 20 мс в мережі з насиченим навантаженням, що перебуває в квазістаціонарному режимі не призведе до порушення цього режиму: загальна кількість переданих за цей час кадрів становить 48 - 68 (табл. 4.4), а ймовірність виникнення колізії p_c зі збільшенням кількості активних станцій в мережі на одну змінюється незначною мірою (табл. 2.1), не більше, ніж на 5%.

На підставі вищенаведеного будемо вважати, що під час повторних спроб передати один голосовий кадр в змішаній мережі ймовірність успішного передавання залишається незмінною і такою, як під час першої спроби.

Ймовірність потрапити в колізію для голосового кадру p_{c_VO} в насиченій мережі буде визначатись співвідношенням:

$$p_{c_VO} = 1 - p_{1_512}. \quad (4.7)$$

Якщо голосовий кадр кілька разів поспіль (R) потрапить в колізію, то ймовірність успішного передавання можна визначити як повну ймовірність події співвідношенням:

$$\begin{aligned} P_{S_VO} &= p_{1_512} + p_{c_VO} \cdot p_{1_512} + p_{c_VO}^2 \cdot p_{1_512} + p_{c_VO}^{i-1} \cdot p_{1_512} + \dots + p_{c_VO}^{R-1} \cdot p_{1_512} = \\ &= p_{1_512} \cdot [1 + p_{c_VO} + p_{c_VO}^2 + \dots + p_{c_VO}^{i-1} + \dots + p_{c_VO}^{R-1}] = 1 - p_{c_VO}^R. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Співвідношення (4.8) відображає той факт, що послідовний перехід до кожної нової спроби обумовлений колізією з ймовірністю p_{c_VO} під час попередньої спроби, а ймовірність передати голосовий кадр під час поточної спроби становить p_{1_512} . Кінцевий вираз отримано як суму членів арифметичної прогресії з урахуванням співвідношення (4.7).

Розрахункові значення ймовірності передати голосовий кадр в режимі конкуренції зі станціями ВЕ з використанням шести повторних спроб (P_{S_VO}) наведено в табл. 4.5, а також для зручності наведено ймовірність потрапити в колізію p_{c_VO} для станції з голосовим трафіком, що отримала доступ до каналу.

Графік ймовірності передати голосовий кадр в змішаній мережі з насиченим навантаженням з першої спроби P_{S_VO} наведено на рис. 4.7.

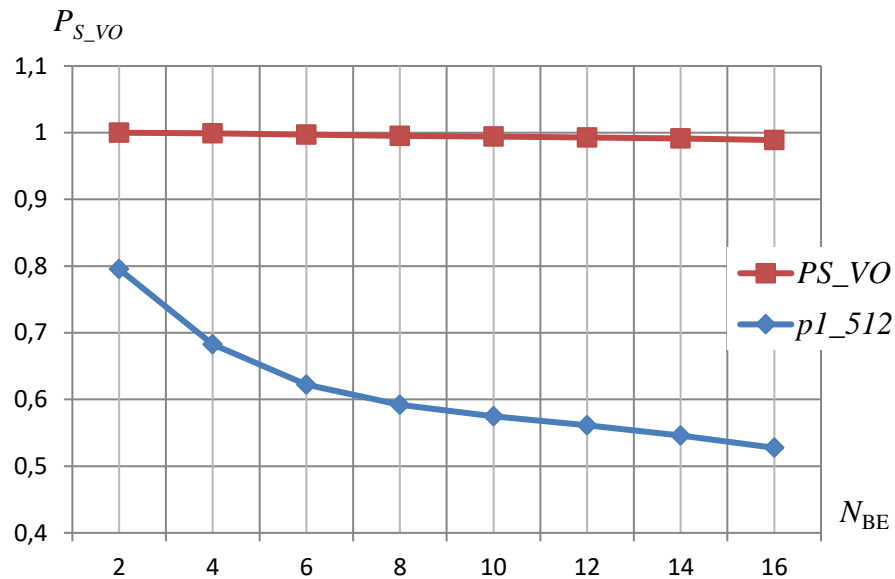


Рисунок 4.7 – Ймовірність успішного передавання голосового кадру однією станцією VO в змішаній мережі з кількома станціями BE з насиченим навантаженням

Зробимо оцінювання того, чи встигне станція з голосовим трафіком передати свій голосовий кадр в мережі з великою кількістю станцій з насиченим навантаженням за період вибірки голосової інформації (20 мс). Для цього визначимо максимальну кількість часових слотів, які можуть знадобитися станції з голосовим трафіком для успішного передавання голосового кадру в змішаній мережі протягом кількох повторних спроб.

Згідно з отриманими значеннями ймовірності успішного передавання голосового кадру P_{S_VO} будемо вважати, що семи послідовних спроб (перша спроба і шість повторних) достатньо, щоб передати голосовий кадр. Щоб визначити, яку максимальну кількість часових слотів треба використати для реалізації семи спроб, скористаємось даними табл. 1.2. Під час першої спроби доступу до каналу для станцій з голосовим трафіком $CW_{\max} = 3$, а під час наступних спроб максимальне число часових слотів очікування має значення $CW_{\max} = 7$. Тобто можливе максимальне число слотів очікування в разі

використання послідовно семи спроб для успішного передавання голосового кадру становитиме $3+7\cdot6 = 45$. Приблизну кількість доступних для використання часових слотів протягом інтервалу 20 мс наведено в табл. 4.4 – Q_1, Q_2 .

Максимальна кількість часових слотів, які можуть знадобитись станції, що передає голосовий трафік для реалізації семи послідовних спроб передати кадр внаслідок виникнення низки послідовних колізій під час передавання (найгірший сценарій) становить 45, а середнє (найбільш імовірне значення) – 22,5. Із отриманих результатів розрахунків, табл. 4.4, випливає, що в мережах з кількістю насичених станцій 2, ..., 16 кількість вільних часових слотів, наявних протягом 20 мс, значно більше кількості слотів, необхідних станції з голосовим навантаженням для подолання колізії. В разі необхідності станція з голосовим трафіком може здійснити більше двох циклів по сім спроб (що дуже мало ймовірно) і гарантовано передати кадр. На підґрунті отриманих результатів, табл.4.3 та рис.4.7 можна зауважити, що у мережах зі змішаним трафіком з пріоритизацією завдяки скороченому конкурентному вікну одиничні кадри голосового трафіку будуть передані з великою ймовірністю. Можна прогнозувати, що в змішаних мережах з насиченим трафіком ВЕ, одночасно можуть функціонувати від чотирьох до одинадцяти станцій з голосовим трафіком залежно від кількості активних станцій з насиченим навантаженням.

В разі застосування агрегування кадрів в мережі з насиченим навантаженням кількість вільних часових слотів в інтервалі 20 мс, коли можуть бути передані голосові кадри значно зменшується оскільки тривалість циклу передавання агрегованого кадру значно більше тривалості циклу передавання звичайного кадру даних. Тривалості передавання агрегованих кадрів максимальної величини наведено в табл. 2.3 і табл. 2.5. Якщо мережні пристрої налаштовані на передавання агрегованих кадрів максимальної тривалості, табл. 2.5, тоді тривалість циклу передавання одного кадру в каналі з частотною смугою 20 МГц становить 5424 мкс, що у 12,85 разів більше тривалості циклу передавання одного неагрегованого кадру з корисним навантаження 1500

байтів (421,9 мкс). Таким чином кількість вільних часових слотів протягом часового інтервалу 20 мс в розглянутому режимі згідно з даними, наведеними в табл. 4.4, становитиме 10-20. Така кількість вільних часових слотів може забезпечити функціонування не більше 1-3 голосових з'єднань.

Висновки до розділу

У результаті дослідження особливостей передавання голосового трафіка для організації послуги IP-телефонії в офісних приміщеннях засобами мережі IEEE 802.11ac з'ясовано, що в разі застосування пріоритизації мережного трафіка можна забезпечити якісне надання зазначеної послуги для великої кількості користувачів, навіть за умови інтенсивного передавання змішаного трафіка.

Кодеки голосових сигналів забезпечують ефективне стиснення, що обумовлює малу тривалість циклу доступу до безпроводового каналу для передавання голосового кадру, навіть за умови великої частки непродуктивних витрат часу. За наявності в зоні обслуговування точки доступу 15-20 активних клієнтів, що передають голосовий трафік, затримка передавання буде меншою за тривалість інтервалу вибірки. Результати отримано, з урахуванням характеристик кодека G.711, що формує великий блок цифрових даних на виході. Водночас отримані результати можна розповсюдити на інші мережі, в яких застосовані інші голосові кодеки з такими ж або меншими блоками цифрових даних на виході.

Отримані результати можна розповсюдити і на безпроводові мережі, в яких голосові дані передають шляхом агрегування кількох голосових кадрів. Чим менше величина агрегованих кадрів, тим більше голосових з'єднань може підтримати мережа зі змішаним трафіком. В разі планування змішаної мережі з підтримкою голосових з'єднань доцільно не використовувати агрегування кадрів з низьким пріоритетом або використовувати адаптивне керування мережею, за якого в разі наявності голосових з'єднань застосовується заборона

на агрегування кадрів.

Для організації мережі з окремим каналом для голосових з'єднань доцільно використовувати канал з шириною радіочастотної смуги 20 МГц.

Наведені вище висновки стосуються мереж, в яких для надання послуг IP-телефонії здійснено пріоритизацію згідно зі специфікацією IEEE 802.11e з наданням голосовому трафіку пріоритету AC_VO, а іншим даним, які передають тією ж мережею – AC_BK або AC_BE.

В мережах із змішаним трафіком і його пріоритизацією завдяки скороченому конкурентному вікну кадри голосового трафіку можуть бути гарантовано передані, навіть за умови великої кількості активних станцій з таким трафіком.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗПРОВОДОВОГО КАНАЛУ ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ

5.1 Організація і планування експериментальних досліджень

Для дослідження вибираємо точку доступу (ТД) з прошивкою, яка дозволяє контролювати режими функціонування і пропускну здатність висхідного і нисхідного каналів. В наших експериментах використано точку доступу (ТД) MT76x2E 802.11 ac/n (ТД1), рис. Б.5, з прошивкою OpenWrt. Додатково розглянуто характеристики ТД HUAWEI WiFi WS5200 (ТД2), рис. Б.4, з прошивкою виробника. Первинним каналом (primary channel) для обох ТД є канал з номером 36 (5180 ГГц).

У процесі експериментів досліджено швидкість передавання даних із застосуванням безпроводових каналів із шириною частотної смуги 20, 40 та 80 МГц, а також рівень навантаження безпроводового каналу в разі здійснення двох та чотирьох голосових з'єднань.

Для дослідження експлуатаційних характеристик мережі використано вбудовані функціональні можливості OpenWrt [73], програмні застосунки Wi-Fi Analyzer [74] і SpeedTest [75].

Пропускную здатність каналу оцінюємо із застосуванням спеціально підібраного файлу великого обсягу. У дослідженні використано файл lg-uhd-LG-Europe-(www.demolandia.net).mp4 обсягом 2 139 640 кБ (2,1 гігабайтів).

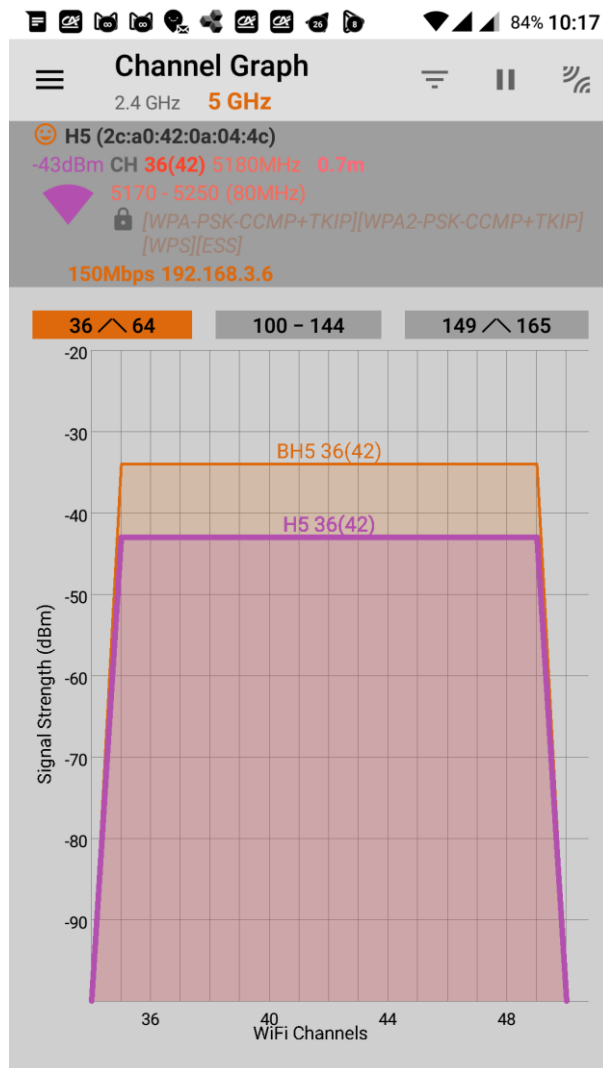
Дослідження впливу взаємної орієнтації антен ТД і абонентської станції (АС) зроблено із застосуванням застосунків Wi-Fi Analyzer установлених на смартфоні LeEco Le Pro 3 Elite X720 (AC3) і точці доступу ТД1.

5.2 Оцінювання впливу взаємного орієнтування приймальних і передавальних антен станцій безпроводової мережі

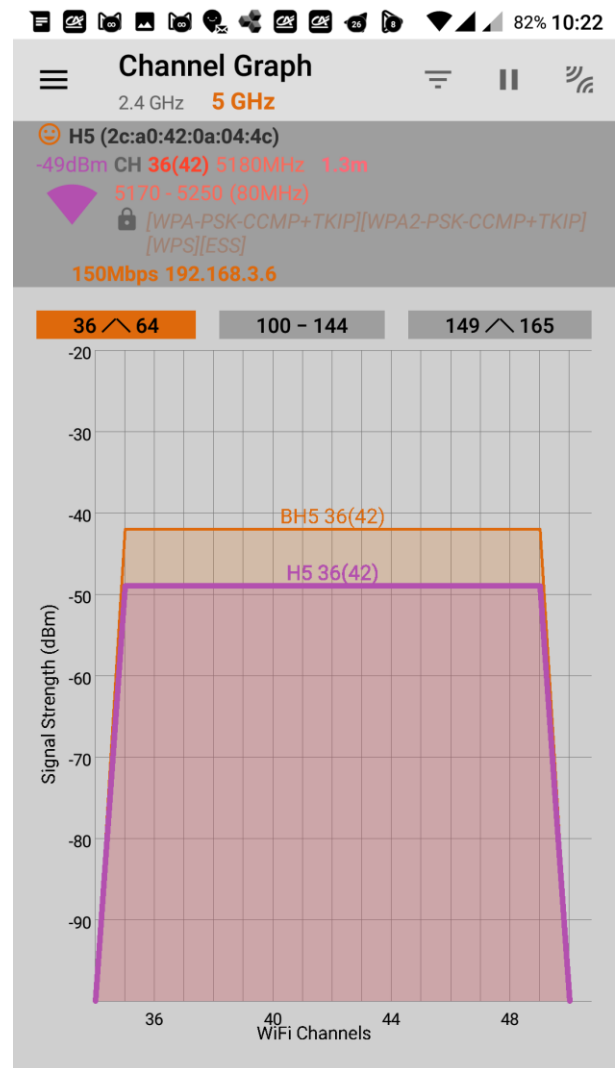
Результати перевірки ширини робочої частотної смуги і рівня сигналу на

вході приймальної антени абонентської станції здійснених із застосуванням застосунка Wi-Fi Analyzer, встановленого на смартфоні LeEco Le Pro 3 Elite X720, наведено на рис 5.1 та рис.5.2.

Для зручності сприйняття, зображення, отримані на екрані смартфона (скріншоти), подано з інверсією кольорів.



а)



б)

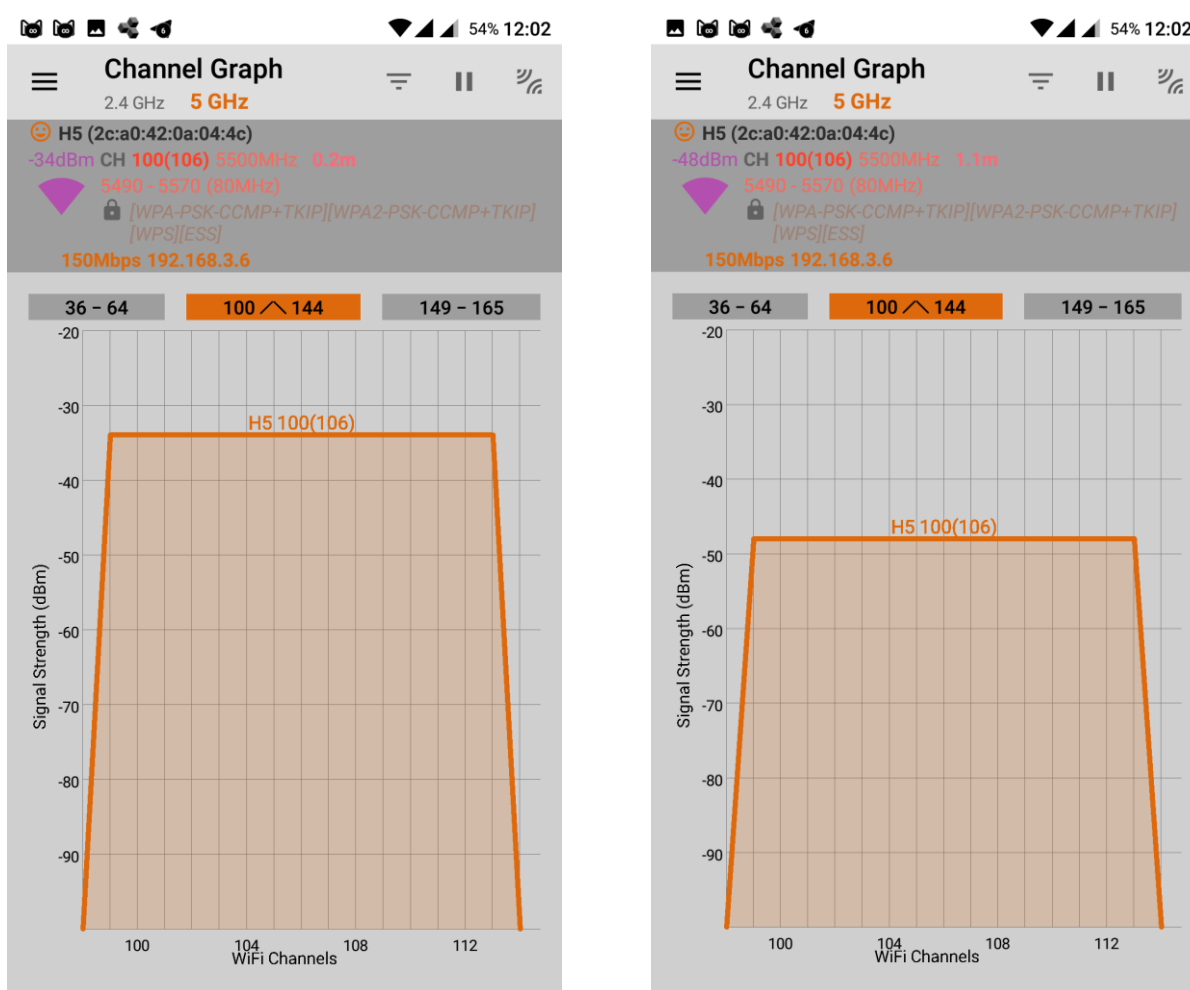
Рисунок 5.1 – Характеристики частотної смуги каналу 36 досліджуваної мережі

На рис. 5.1 наведено амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) каналу з частотною смугою 80 МГц з початковим номером 36, що належить до першого частотного піддіапазону діапазону 5 ГГц, рис. 1.1. Із застосуванням ТД2 зроблено оцінювання АЧХ каналу з номером 100 для другого піддіапазону діапазону 5 ГГц, рис. 5.2.

На рис. 5.1а наведено АЧХ каналу у разі узгодженого розташування антен

ТД1 і АС1. На рис. 5.1б наведено АЧХ каналу за умови максимальної неузгодженості приймальних і передавальних антен при розташуванні АС3 на відстані 3 м від ТД1.

На рис. 5.1 присутні характеристики двох безпроводових мереж Н5 та ВН5. Мережу Н5 організовано із застосуванням ТД2, що має чотири приймально/передавальні антени, рис. Б.4, а мережу ВН5 організовано із застосуванням ТД2, що має дві приймально/передавальні антени, рис. Б.5.



а)

б)

Рисунок 5.2 – Характеристики частотної смуги каналу 100 досліджуваної мережі

Рівень сигналу на вході АС3 обумовлений не тільки сигналом, що надійшов за лінією прямої видимості, а є результатом багатопроменевого розповсюдження в дослідному приміщенні.

Відстань від ТД до АС становить приблизно 3 м. На рис. 5.1 наведено

різні відстані до від ТД до АС оскільки алгоритмом визначення відстані у застосунку Wi-Fi Analyzer закладено оцінювати відстань за рівнем прийнятого сигналу. Із порівняння реальної відстані (3 м) і оціночної відстані (0,7 м і 1,3 м, рис. 5.1) випливає, що в дослідному приміщенні відбиті від різних поверхонь промені створюють значний рівень сигналу на вході АС3.

Із порівняння АЧХ, наведених на рис. 5.1 випливає, що для ТД1 (мережа ВН5) максимальна неузгодженість приймально/передавальних антен в дослідному приміщенні призводить до зменшення рівня прийнятого сигналу на 8 дБм, а для ТД2 (мережа Н5) – до зменшення рівня сигналу на 6 дБм.

За результатами порівняння АЧХ каналу номер 100 з узгодженими і неузгодженими антенами ТД2 і АС3 робимо висновок, що рівень сигналу, прийнятого АС3 залежно від просторової орієнтації самого мережного пристрою (АС) на відстані 3 м від ТД2 може змінюватись в межах 14 дБм від «мінус» 34 дБм до «мінус» 48 дБм.

Як впливає із наведених характеристик, рис. 5.1 та рис. 5.2, рівень сигналу в межах частотної смуги безпроводового каналу у разі узгодженого розташування антен становить -34 дБм, а у разі максимальної неузгодженості становить -48 дБм, що є достатнім для застосування найбільш швидкісного режиму модуляції і кодування MCS9 в частотній смузі 80 МГц (RSSI= -51 дБм).

5.3 Оцінювання пропускної здатності безпроводового каналу мережі передавання даних стандарту IEEE802.11ac

Дослідження швидкості передавання даних у каналах з різною шириною частотної смуги здійснено із застосуванням ТД1, на якій встановлено прошивку OpenWrt.

5.3.1 Функціональні можливості застосунку OpenWrt

Застосунок OpenWrt – це прикладна програма з відкритим кодом,

розроблена для керування точками доступу безпроводових мереж стандарту IEEE802.11. З плином часу розробники цього програмного забезпечення оновлюють функціональні можливості застосунку з урахуванням особливостей оновленої апаратної частини точок доступу нових поколінь і певного періоду випуску.

В нашому дослідженні використано версію OpenWrt (2019 рік), розроблену для застосування в точках доступу з апаратним забезпеченням, подібним до MT76x2E 802.11 ac/n (Тайвань).

Застосунок має зручний інтерфейс і його можна використовувати як для конфігурування точки доступу, так і для контролю експлуатаційних параметрів.

Під час дослідження використано такі функції застосунку:

- контроль стану безпроводової мережі (wireless network), рис. 5.3;
- побудова графіків навантаження (payload graphics), рис. Б.1;
- аналіз безпроводового середовища (channel analysis), Б.2.

Крім того використано графічне меню для конфігурування точки доступу, рис. Б.3.

Графічний інтерфейс контролю стану безпроводової мережі (Wireless Overview) відображає інформацію про стан мереж, які підтримує точка доступу, рис. 5.3:

- про мережу ВН1 в діапазоні 2,4 ГГц (два верхні рядки на рис. 5.3);
- про мережу ВН5 в діапазоні 5 ГГц (третій і четвертий рядки на рис. 5.3).

Інформація про канал містить: назву точки доступу, перелік підтримуваних специфікацій стандарту IEEE802.11, номер робочого каналу і нижню частоту каналу, рівень сигналу від приєднаної станції, можливу максимальну швидкість передавання, фізичну адресу і можливі способи шифрування сигналу в каналі.

Друга частина розглянутого графічного інтерфейсу містить інформацію про приєднані станції (Associated Stations): до якої мережі приєднана станція, фізичну адресу станції, IP-адресу станції або назву, рівень сигналу фізичного

з'єднання, можливу швидкість приймання і передавання установленого з'єднання, ширину робочої частотної смуги, індекс модуляції і кодування.

The screenshot shows the OpenWrt web interface. At the top, there's a navigation bar with 'OpenWrt', 'Status', 'System', 'Network', 'Statistics', and 'Log out'. A 'REFRESHING' button is on the right. Below this is the 'Wireless Overview' section, which lists two radio interfaces: radio0 (MediaTek MT7603E 802.11b/g/n) and radio1 (MediaTek MT76x2E 802.11ac/n). Each radio has a signal strength indicator, SSID, Mode, BSSID, and Encryption details. Below the radio overview is the 'Associated Stations' section, which displays a table of connected devices. The table has columns for Network, MAC address, Host, Signal / Noise, and RX Rate / TX Rate. There are four entries in the table, each with a 'Disconnect' button. At the bottom right, there are 'Save & Apply' and 'Save' buttons.

Network	MAC address	Host	Signal / Noise	RX Rate / TX Rate
Access Point "BH1" (phy0-ap0)	00:0A:F5:89:89:FF	192.168.1.136	-60 dBm	6.0 Mbit/s, 20 MHz 65.0 Mbit/s, 20 MHz, MCS 6, Short GI
Access Point "BH5" (phy1-ap0)	38:DE:AD:6F:90:F5	HP250.lan (192.168.1.207)	-53 dBm	433.3 Mbit/s, 80 MHz, VHT-MCS 9, VHT-NSS 1, Short GI 433.3 Mbit/s, 80 MHz, VHT-MCS 9, VHT-NSS 1, Short GI
Access Point "BH5" (phy1-ap0)	28:FE:CD:73:9B:E6	192.168.1.123	-61 dBm	6.0 Mbit/s, 20 MHz 150.0 Mbit/s, 40 MHz, MCS 7, Short GI
Access Point "BH5" (phy1-ap0)	48:51:B7:15:D5:D3	LAT3540_B.lan (192.168.1.205, fd81:e40b:cfc0:4577:78b2:1636:50a7)	-52 dBm	650.0 Mbit/s, 80 MHz, VHT-MCS 7, VHT-NSS 2, Short GI 866.7 Mbit/s, 80 MHz, VHT-MCS 9, VHT-NSS 2, Short GI

Рисунок 5.3 – Графічний інтерфейс контролю стану мережі застосунку OpenWrt

Графік навантаження, рис. Б.2, відтворює інтенсивність передавання даних як функцію часу. Додатково на екрані відображується інформація про усереднену швидкість і пікові значення швидкості передавання даних.

Важливим є розуміння алгоритму побудови графіків і обчислення усередненої швидкості передавання даних. Підрахунок усередненої швидкості передбачено здійснювати в межах часового вікна тривалістю 3 хв шляхом ділення прийнятого обсягу даних на тривалість інтервалу приймання. Часовий крок оновлення інформації про обсяг прийнятих даних становить 3 с.

Під час досліджень, зроблених в даній дисертаційній роботі, у разі, коли інтервал передавання контрольного блоку інформації становив менше 3 хв, здійснено безпосередній розрахунок швидкості передавання шляхом ділення обсягу контрольного блоку даних (випробний кадр) на тривалість інтервалу передавання, визначеного за графіком, побудованим застосунком OpenWrt.

5.3.2 Результати вимірювання швидкості передавання даних каналу безпроводової мережі IEEE802.11ac

Для дослідження пропускної здатності каналу використано два ноут-буки. Один ноутбук (АС 1) моделі LAT3540 має дві вбудовані антени, оперативний запам'ятовувальний пристрій 8 ГБ, накопичувач даних на жорсткому диску, підтримує мережний стандарт Gigabit Ethernet, інший (АС 2) – моделі HP250 має одну вбудовану антену, оперативний запам'ятовувальний пристрій 16 ГБ, і твердотільний накопичувач даних (SSD), підтримує мережний стандарт Gigabit Ethernet.

Схему вимірювання наведено на рис. 5.4.

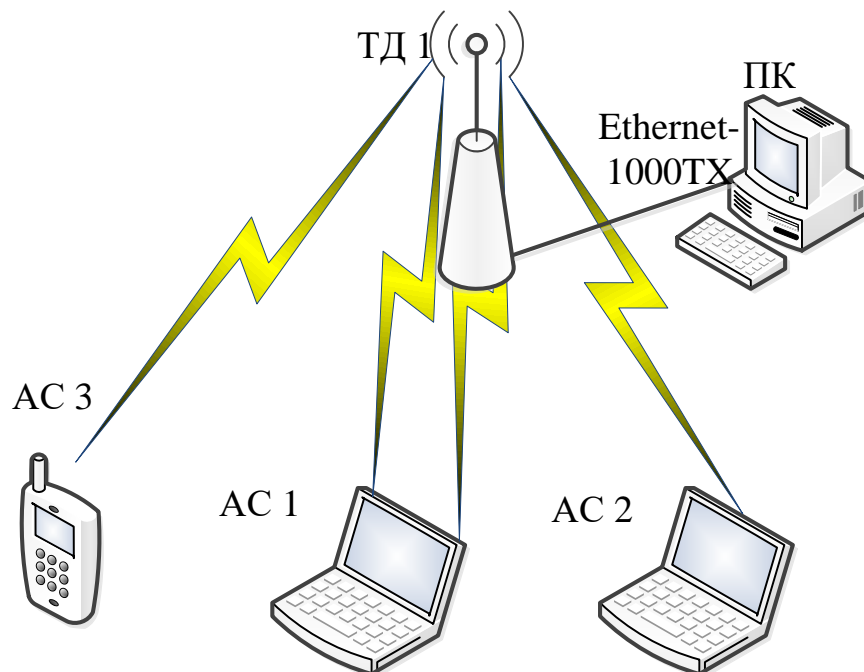


Рисунок 5.4 – Схема експериментальної локальної мережі

На стаціонарному комп'ютері (ПК) у спільній папці знаходиться файл обсягом 2 139 640 кБ. Для визначення пропускної здатності каналу з певною шириною частотної смуги на першому етапі передаємо випробний файл на станцію АС1, на другому етапі передаємо випробний файл на станцію АС2, на третьому етапі передаємо випробний файл на обидві станції одночасно в режимі МІМО. Для визначення максимальної пропускної здатності безпроводових каналів з різною шириною частотної смуги проведено 15 серій випробувань із «закачуванням» великого блоку даних. Отримані в окремих серіях результати близькі за числовими значеннями. В кількох серіях мало місце зменшення пропускної здатності каналу при роботі з АС1 внаслідок часткового розряду батареї і переходу ноутбука в режим «збалансованого енергоспоживання» (balanced). Максимальну пропускну здатність можна отримати за умови роботи ноутбука в режимі живлення «максимальної продуктивності» (maximum performance). У такому разі передавання даних відбувається в режимі MCS8 (смуга 20 МГц), MCS9 (смуга 40 і 80 МГц), рис. 5.3.

Результати натурних випробувань наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Пропускна здатність безпроводового каналу мережі IEEE802.11ac

Станція	Частотна смуга каналу 20, МГц		Частотна смуга каналу 40, МГц		Частотна смуга каналу 80, МГц	
	$\Delta t_{\text{п}}, \text{с}$	S Мб/с	$\Delta t_{\text{п}}, \text{с}$	S Мб/с	$\Delta t_{\text{п}}, \text{с}$	S Мб/с
АС 1	136,29	143,67	59,14	289,42	46,29	369,81
АС 2	180	60,65	118,29	144,71	50,57	338,47
АС1+АС2	180	83,07	180	186,72	95,14	359,82

Примітка. Станція АС1 приймає сигнали на дві антени, а станція АС2 – на одну.

Пропускную здатність каналу в разі наявності трьох активних станцій з насиченим навантаженням визначено для частотної смуги 20 МГц, рис.5.5. Для цього застосовано ще один ноутбук компанії DELL lat3540 (АС4) з двома приймально/передавальними антенами. Швидкість передавання даних між АС4 і ТД1 приблизно така сама, як і між АС1 і ТД1, табл.5.1. Загальна усереднена

швидкість передавання в мережі з трьома насиченими станціями (режим MCS8) становить 99,09 Мб/с.

Треба звернути увагу на те, що оцінка рівня сигналу на вході абонентських станцій суттєво різна, рис.5.5, хоча всі станції знаходяться приблизно на однаковій відстані від точки доступу (2,5 м), що свідчить про багатопроменевий режим розповсюдження сигналів.

Associated Stations







Network	MAC address	Host	Signal / Noise	RX Rate / TX Rate	
 Access Point "BH5" (wlan5)	48:51:B7:15:D5:D3	LAT3540_B.lan (192.168.1.205, fdb1:d53e:3d53:0:913:e65b:121a:f25d)	 -57 dBm	72.2 Mbit/s, 20 MHz, VHT-MCS 7, VHT-NSS 1, Short GI 173.3 Mbit/s, 20 MHz, VHT-MCS 8, VHT-NSS 2, Short GI	Disconnect
 Access Point "BH5" (wlan5)	38:DE:AD:6F:90:F5	HP250.lan (192.168.1.207, fdb1:d53e:3d53:0:4a0:fbf2:8457:1860)	 -36 dBm	6.0 Mbit/s, 20 MHz 86.7 Mbit/s, 20 MHz, VHT-MCS 8, VHT-NSS 1, Short GI	Disconnect
 Access Point "BH5" (wlan5)	80:19:34:E7:2A:02	lat3540.lan (192.168.1.164)	 -42 dBm	6.0 Mbit/s, 20 MHz 173.3 Mbit/s, 20 MHz, VHT-MCS 8, VHT-NSS 2, Short GI	Disconnect
					Save & Apply Save

Рисунок 5.5 – Характеристики мережі з трьома активними станціями

Для отримання об'єктивної картини зроблено вимірювання максимальної швидкості передавання даних засобами застосунку SpeedTest. Ці вимірювання зроблено із застосуванням станції А1 й точок доступу ТД1 і ТД2, а також із застосуванням смартфона LeEco Le Pro 3 Elite X720 (A3), рис.5.6.

Результати вимірювання пропускної здатності застосунком SpeedTest наведено в табл.5.2.

Таблиця 5.2 – Пропускна здатність безпроводового каналу за результатами зовнішнього тестування

Станція	Частотна смуга каналу, МГц	ТД1		ТД2		Швидкість зовнішнього Ethernet з'єднання з Інтернет, МГб/с	
		S, Мб/с		S, Мб/с			
		Низхідний потік	Висхідний потік	Низхідний потік	Висхідний потік	Низхідний потік	Висхідний потік
АС1	80	327,6	206,5	364,3	195,2	898,1	720,7
АС3	40	98,8	83,1	102,4	78,6	815,2	673,6

Слід зазначити, що значення пропускної здатності безпроводового каналу мережі IEEE802.11ac, наведені в табл.5.1 і табл.5.2 є деякими медіанними величинами, отриманими в результаті багаторазових (більше 15 серій) в різний час доби. Діапазон можливих значень пропускної здатності лежить в межах $\pm 5\%$ від значень, наведених у зазначених таблицях. Ця відмінність результатів вимірювання обумовлена завантаженням процесорів комп'ютерів, приєднаних до мережі, виконанням системних функцій, а в разі застосування SpeedTest навантаженням файлообмінного сервера і затримками пакетів у зовнішній мережі.

OpenWrt Status System Network Log out REFRESHING

Wireless Overview

Interface	Hardware	Channel	Bitrate	Buttons
radio0	MediaTek MT7603E 802.11b/g/n	1 (2.412 GHz)	? Mbit/s	Restart Scan Add
radio0	SSID: BH1 Mode: Master BSSID: D4:5F:25:FD:CE:EC Encryption: None			Disable Edit Remove
radio1	MediaTek MT76x2E 802.11ac/n	36 (5.180 GHz)	150 Mbit/s	Restart Scan Add
radio1	SSID: BH5 Mode: Master BSSID: D4:5F:25:FD:CE:EE Encryption: None			Disable Edit Remove

Associated Stations

Network	MAC address	Host	Signal / Noise	RX Rate / TX Rate	Buttons
Access Point "BH5" (phy1-ap0)	B4:EF:FA:ED:CB:32	android-de06be4494f1f144.lan (192.168.1.229, fd15:1d8f:25bd:0:1d79:f052:4558:85ad)	-34 dBm	120.0 Mbit/s, 40 MHz, MCS 5, Short GI 150.0 Mbit/s, 40 MHz, MCS 7, Short GI	Disconnect

Save & Apply Save

Рисунок 5.6 – Характеристика мережі, в якій активною станцією є смартфон

5.3.3 Параметри голосового трафіку

Окремі аспекти процесу передавання голосового трафіку досліджено із застосуванням застосунків Viber та Telegram. У процесі експерименту визначено інтенсивність голосового трафіку в разі двох, рис. 5.7, і чотирьох, рис. 5.8, голосових з'єднань, а також перевірено вплив голосового трафіку на

пропускну здатність безпроводового каналу.

На рис. 5.7 і рис. 5.8 присутні великі піки інтенсивності потоку даних, які пов'язані з передаванням не голосової інформації, що передбачено протоколом застосунку Telegram.

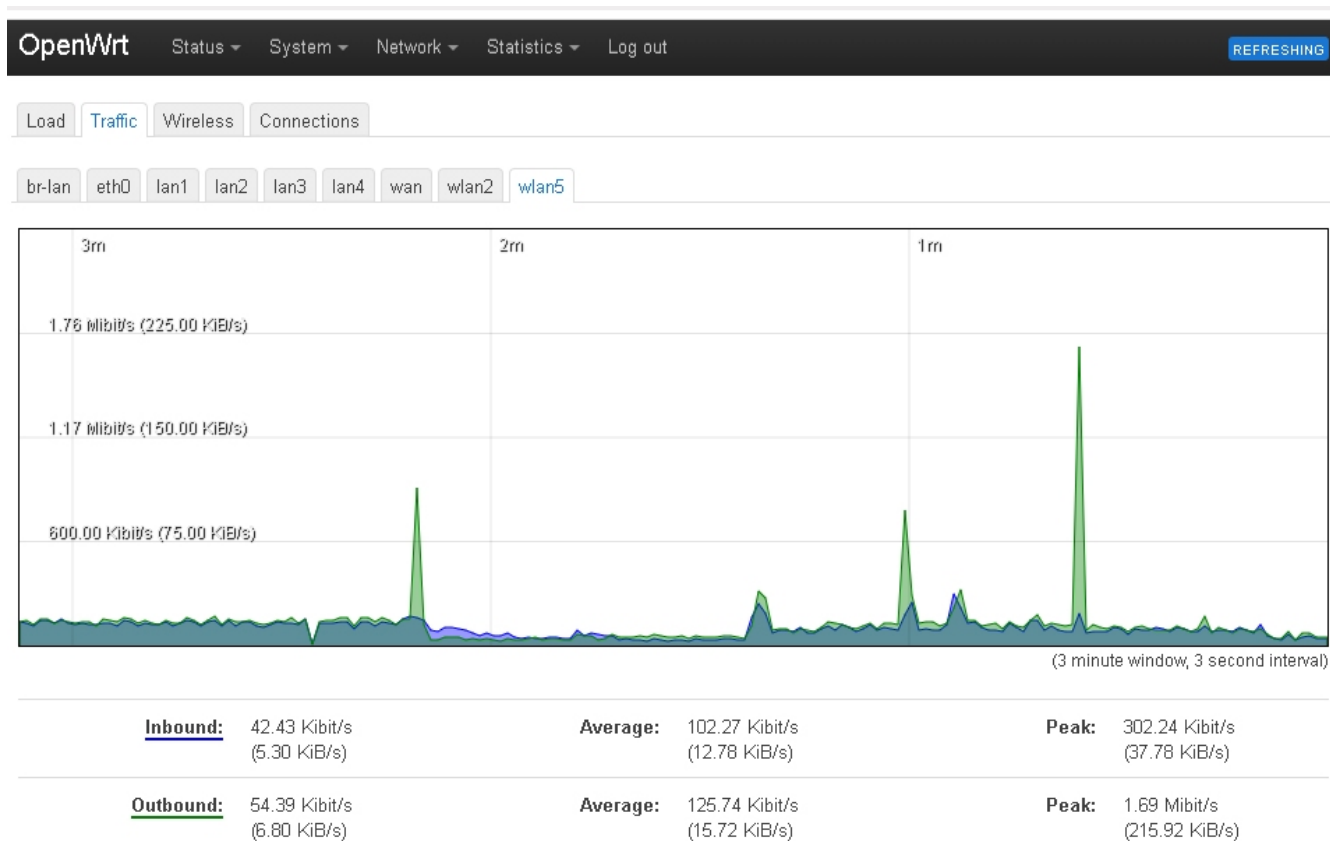


Рисунок 5.7 – Інтенсивність навантаження безпроводового каналу в разі реалізації двох голосових з'єднань в застосунку Telegram

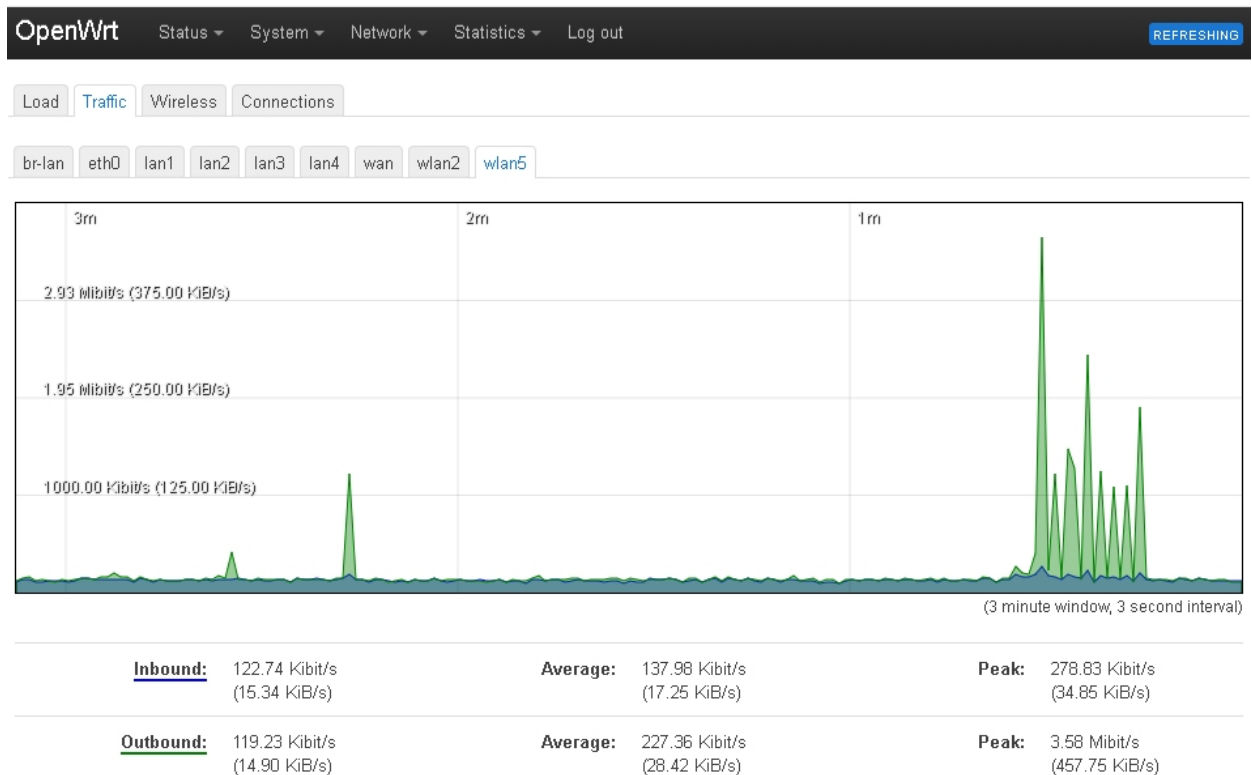


Рисунок 5.8 – Інтенсивність навантаження безпроводового каналу в разі реалізації чотирьох голосових з'єднань в комунікаторі Telegram

Під час експерименту ці дані надходять ззовні на абонентську станцію, що обумовлює більше значення вихідного потоку ТД1 (Outbound) порівняно зі вхідним потоком (Inbound).

Усереднена інтенсивність голосового трафіку при двох активних з'єднаннях становить 102,27 кбіт/с, а при чотирьох активних голосових з'єднаннях 137,98 кбіт/с. Тобто підімкнення двох активних станцій з голосовим трафіком призвело до збільшення потоку даних на 35,71 кбіт/с. В комунікаторі Telegram передбачено можливість використовувати низку кодеків з малою інтенсивністю стислого потоку [76]. В даному експерименті схоже був застосований кодек iLBC, табл. 4.1.

В окремому експерименті перевірено вплив голосового трафіку на пропускну здатність безпроводового каналу зі змішаним трафіком. Одночасно в каналі відбувалось передавання дослідного файлу і були активними чотири голосові з'єднання. Швидкість передавання загальних даних знаходилась в тих же межах, що і без голосового трафіку, а відтворені голосові повідомлення (за

суб'єктивною оцінкою) не зазнали ніяких спотворень.

На підґрунті отриманих результатів можна зробити висновок, що в мережі зі змішаним трафіком, в якій є одиничні кадри, агреговані кадри відносно невеликих розмірів (web-відео, відео звичайної чіткості тощо), які надходять з певною періодичністю, можна одночасно забезпечити не менше двох десятків голосових з'єднань, завдяки великій кількості вільних слотів конкурентного вікна.

5.3.4 Аналіз отриманих експериментальних результатів

Під час експериментів абонентські станції були розташовані на незначній відстані від точки доступу, що обумовило можливість використати найбільш продуктивні режими модуляції і кодування (MCS) для визначення максимальної пропускної здатності каналу.

Порівняно із значеннями пропускної здатності безпроводового каналу мережі IEEE802.11ac без агрегування кадрів, наведеному в другому розділі даної дисертації, рис.2.9 – 2.17, максимальна пропускна здатність каналу, отримана в експериментальних дослідженнях, значно більше, табл. 5.1 – 5.2. З іншого боку, експериментальні значення максимальної пропускної здатності значно менші, ніж отримані в другому розділі значення для режиму передавання максимально великих агрегованих кадрів, табл. 2.5.

Зазначене співвідношення між розрахунковими і експериментальними значеннями можна пояснити тим, що в налаштуваннях точок доступу закладено режим передавання (за можливості) агрегованих кадрів з обмеженою кількістю об'єднаних кадрів або з обмеженим обсягом загальної величини агрегованого кадру (менше максимальної величини, передбаченої стандартом).

Оскільки основною технологією проводових мереж є технологія Ethernet максимальний розмір блоку корисного навантаження пакету даних (Maximum Transmission Unit – MTU), установлений в налаштуваннях точок доступу становить 1500 байтів.

Під час здійснення експериментів з визначення пропускної здатності в межах локальної мережі і засобами застосунку SpeedTest розмір MTU становив 1468 байтів (результати вимірювання застосунком WireShark).

У разі обслуговування сервісів з безперервним передаванням пакетів (насичене навантаження) мережа IEEE802.11ac здійснює передавання безпроводовим каналом агрегованих файлів, величина яких визначена налаштуваннями виробника.

Застосування двох просторових потоків в каналах з частотними смугами 20 і 40 МГц забезпечує подвоєння пропускної здатності каналу порівняно з однопотоковим передаванням даних, табл. 5.1. У разі використання двох просторових потоків в каналі завширшки 80 МГц збільшення пропускної здатності є незначним, що може бути обумовлено зменшенням індексу MCS через складність оброблення сигнальних потоків та впливом умов багатопроменевого розповсюдження.

Висновки до розділу

Під час здійснення експериментальних досліджень функціонування мереж передавання даних з'ясовано числові значення пропускної здатності безпроводових каналів завширшки 20, 40 і 80 МГц. Отримані результати підтверджують правильність результатів, отриманих під час теоретичного дослідження експлуатаційних характеристик мереж передавання даних стандарту IEEE802.11ac.

Для отримання максимальних значень пропускної здатності безпроводового каналу необхідно розташовувати точку доступу на достатній відстані, за якої потужність сигналу на вході абонентської станції перевищує мінімально необхідний рівень сигналів, що забезпечує застосування відповідного індексу модуляції і кодування. Наявність умов багатопроменевого розповсюдження сигналів суттєво впливає на рівень вхідного сигналу абонентської станції і може відрізнятись на однаковій відстані від ТД на 15 дБ.

Неузгодженість просторового положення приймально/передавальних антен ТД і АС призводить до зменшення рівня вхідного сигналу АС. Зменшення рівня сигналу може сягати 14 дБ.

У разі обслуговування сервісів з безперервним передаванням пакетів (насичене навантаження) мережа IEEE802.11ac здійснює передавання безпроводовим каналом агрегованих файлів, величина яких визначена налаштуваннями виробника.

В мережах IEEE802.11ac зі змішаним навантаженням можлива організація не менше чотирьох одночасно активних голосових з'єднань без втрати якості відтвореного голосового сигналу і якісних показників функціонування безпроводового каналу.

ВИСНОВКИ

У процесі роботи над дисертацією узагальнене завдання дисертації спрямоване на поглиблене дослідження впливу технологічних параметрів на експлуатаційні характеристики електронної безпроводової системи передавання даних за специфікацією 802.11ac для удосконалення процесу проектування і експлуатації зазначених мереж шляхом врахування гранично можливого рівня якісних показників повністю виконано.

Під час виконання дисертаційної роботи отримано такі результати:

1. Отримано кількісну оцінку експлуатаційних характеристик безпроводового каналу в разі функціонування мережі в режимі без агрегування кадрів даних. В такому режимі найбільша пропускна здатність безпроводового каналу буде досягнута, якщо активними є чотири станції, що безперервно передають блоки даних. Розмір блоків корисної інформації (MTU), що надходять ззовні до локальної мережі обмежені величиною 1500 байтів.

2. У разі наявності в мережі одночасно багатьох активних станцій (16 і більше), що намагаються передавати насичений трафік пропускна здатність каналу помітно зменшиться через виникнення колізій, оскільки частину кадрів (3,66% в разі наявності 16 активних станцій) деякі станції не будуть встигати передавати за 7 спроб (перша спроба і 6 повторних).

3. У разі передавання одиничних кадрів (з навантаженням до 1500 байтів) або невеликих агрегованих кадрів застосування систем модуляції і кодування MCS8 і MCS9 (модуляція QAM-256, швидкості протизавадного коду 3/4 та 5/6 відповідно) перехід від MCS8 до MCS9 в каналі з частотною смугою 40 МГц збільшує пропускну здатність на 1,24 % (з 36,584 до 37,036 Мб/с), а в каналі з частотною смугою 80 МГц, рис. 2.14, – на 1,4 % (з 41,665 до 42,252 Мб/с).

4. Розширення частотної смуги з метою збільшити пропускну здатність каналу є малоефективним засобом в разі передавання одиничних кадрів або невеликих агрегованих кадрів. Якщо в мережі з насиченим навантаженням кадрами по 1500 байтів застосовано систему модуляції і кодування MCS8

збільшення частотної смуги з 20 МГц до 40 МГц призводить до збільшення максимальної пропускної здатності на 20,73 % (з 30,302 до 36,584 Мб/с), а збільшення з 20 МГц до 80 МГц – на 37,5 % (з 30,302 до 41,665 Мб/с). У разі застосування в мережі системи модуляції і кодування MCS9 збільшення частотної смуги з 40 МГц до 80 МГц призводить до збільшення максимальної пропускної здатності на 14,0973 % (з 37,036 до 42,256 Мб/с).

5. У разі застосування агрегованих кадрів для передавання насиченого трафіку (наприклад, «закачка» великих файлів) пропускна здатність безпроводового каналу значно зростає. Так в разі агрегування вхідних файлів PSDU до максимального рівня передбаченого в специфікації IEEE802.11ac (11454 байти) пропускна здатність каналу зростає до 68,5 Мбіт/с (коефіцієнт корисного навантаження $k=78,97\%$) в каналі 20 МГц, до 126,4 Мбіт/с ($k=62,2\%$) в каналі 40 МГц і до 195 ($k=45\%$) Мбіт/с в каналі 80 МГц, що значно підвищує ефективність використання частотного ресурсу мережі.

6. Розмір зони обслуговування залежить від застосованого в мережі режиму модуляції й кодування, і радіус зони може змінюватись до десяти разів. В Україні рівень випромінюваної точкою доступу потужності обмежений на рівні 100 мВт. Обмеження рівня випромінюваної потужності призводить до зменшення зони обслуговування точки доступу в разі застосування технології MIMO. В разі застосування двох просторових потоків радіус зони обслуговування зменшується в $\sqrt{2}$ разів, а в разі чотирьох потоків – в 2 рази. Співканальні завади можуть надходити від мереж, що знаходяться на відстані в кілька десятків метрів, внаслідок передавання «старої» преамбули кадрів керування і кадрів даних для взаємодії з абонентськими пристроями більш ранніх специфікацій, що може призвести до формування оцінки зайнятості каналу і переходу пристроїв мережі в режим очікування.

7. Для отримання максимальних значень пропускної здатності безпроводового каналу необхідно розташовувати точку доступу на достатній відстані, за якої потужність сигналу на вході абонентської станції перевищує мінімально необхідний рівень сигналів, що забезпечує застосування

відповідного індексу модуляції і кодування. Наявність умов багатопроменевого розповсюдження сигналів суттєво впливає на рівень вхідного сигналу абонентської станції і може відрізнятись на однаковій відстані від ТД на 15 дБ. Неузгодженість просторового положення приймально/передавальних антен ТД і АС призводить до зменшення рівня вхідного сигналу АС. Зменшення рівня сигналу може сягати 14 дБ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Лазебний В. С., Інъ Ченлян, Омельянець О. О. Дослідження реальної пропускної спроможності безпроводової інформаційної мережі специфікації IEEE 802.11n. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. 2018. Т. 29 (68), № 5, Ч. 1. С. 155–160. URL: <https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/archive?id=38>
2. Matthew S.Gast. 802.11ac: A Survival Guide / ed. by M. Loukides, M. Blanchette; illus.: R. Romano, R. Demarest. 2nd ed. USA: O'Reilly Media, 2015. 136 p. URL: <https://freecomputerbooks.com/802.11ac-A-Survival-Guide.html>
3. Lukaszewski C., Liang Li. Very high-density 802.11ac networks/Theory guide. California: Aruba Networks. 62 p. URL: https://howwirelessworks.com/wp-content/uploads/Aruba_VHD_VRD_Theory_Guide.pdf.
4. Поговоримо про Wi-Fi? *Кафедра ракетно-космічних та інноваційних технологій*. URL: <https://dsit.education/blog/2023/pohovorymo-pro-wi-fi/> (дата звернення: 21.10.2024).
5. Chen Huaxing. What Is 802.11ac? *IP Encyclopedia*. URL: <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/802.11ac.html> (date of access: 21.10.2024).
6. Jang S., Shin K. G., Bahk S. Post-CCA and reinforcement learning based bandwidth adaptation in 802.11ac networks. *IEEE transactions on mobile computing*. 2018. Vol. 17, no. 2. P. 419–432. URL: <https://doi.org/10.1109/tmc.2017.2709309>.
7. Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements. *Tektronix*. URL: <https://www.tek.com/en/documents/primer/wi-fi-overview-80211-physical-layer-and-transmitter-measurements>.

8. Bamdeb Ghosh. Interframe Space (RIFS, SIFS, PIFS, DIFS, AIFS, EIFS). *Blog by Bamdeb Ghosh*. URL: <https://wifisharks.com/2020/11/14/interframe-space/?cn-reloaded=1>.
9. Huawei Technologies Co., Ltd. White Paper of Home Wi-Fi Networks with Optimal User Experience. Shenzhen: Huawei Proprietary and Confidential, 2017. 59 p. URL: <https://carrier.huawei.com/~media/CNBG/Downloads/Technical%20Topics/Fixed%20Network/White%20Paper%20of%20Home%20Wi-Fi%20-en.pdf>
10. Graham Smith. 802.11 QoS Tutorial. DSP Group, 2008. 24 p. URL: <https://www.ieee802.org/1/files/public/docs2008/avb-gs-802-11-qos-tutorial-1108.pdf>.
11. IEEE Std 802.11™-2007. IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks— Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Replaces IEEE Std 802.11-1999; effective from 2007-06-12. Official edition. New York, USA, 2007. 1232 p. URL: <https://people.iith.ac.in/tbr/teaching/docs/802.11-2007.pdf>.
12. MCS table and how to use it. *Wireless LAN Professionals*. URL: <https://wlanprofessionals.com/mcs-table-and-how-to-use-it/>.
13. Про внесення змін до постанов Кабінету Міністрів України від 15 грудня 2005 р. №1208 і від 9 червня 2006 р. №815: Постанова Каб. Міністрів України від 15.10.2024 № 801. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/KP220801?an=8>.
14. WLAN 802.11ac. *ShareTechnote*. URL: https://www.sharetechnote.com/html/WLAN_802_11ac.html.
15. Part A. MWS coexistence logical signaling specification. *Bluetooth® Technology*. URL: <https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/Files/Specification/HTML/Core-54/out/en/wireless->

[coexistence-signaling-and-interfaces/mws-coexistence-logical-signaling-specification.html](https://www.nxp.com/design/coexistence-signaling-and-interfaces/mws-coexistence-logical-signaling-specification.html).

- 16..4/5 GHz dual-band 2x2 Wi-Fi 5 (802.11ac) + Bluetooth 5.3 solution. *Automotive, IoT & Industrial Solutions*.
URL: <https://www.nxp.com/products/wireless-connectivity/wi-fi-plus-bluetooth-plus-802-15-4/2-4-5-ghz-dual-band-2x2-wi-fi-5-802-11ac-plus-bluetooth-5-3-solution:88W8997#LCA>.
- 17.Safdari F., Gorbenko A. Theoretical and experimental study of performance anomaly in multi-rate IEEE802.11ac wireless networks. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2022. № 4. P. 85–97.
URL: <https://doi.org/10.32620/reks.2022.4.06> (date of access: 22.10.2024).
- 18.Amewuda A. B., Katsriku F. A., Abdulai J.-D. Implementation and evaluation of WLAN 802.11ac for residential networks in NS-3. *Journal of computer networks and communications*. 2018. P. 1–10.
URL: <https://doi.org/10.1155/2018/3518352> (date of access: 22.10.2024).
- 19.WLAN IEEE 802.11ac testing. *Rohde&Schwarz*. URL: https://www.rohde-schwarz.com/se/solutions/wireless-communications-testing/wireless-standards/wlan-wi-fi/wlan-ieee-802-11ac-testing/wlan-ieee-802-11ac-testing_250899.html.
- 20.Kriara L., Molero E. C., Gross T. R. Evaluating 802.11ac features in indoor WLAN. *MobiCom'16: The 22nd annual International conference on mobile computing and networking*. New York, USA, 2016.
URL: <https://doi.org/10.1145/2980159.2980167> (date of access: 22.10.2024).
- 21.Mohammed Alghamdi. Throughput analysis of IEEE WLAN "802.11 ac" under WEP, WPA, and WPA2 security protocols. *International journal of computer networks (IJCN)*. 2019. Vol. 9. P. 1–13.
URL: <https://www.cscjournals.org/library/manuscriptinfo.php?mc=IJCN-334>.
- 22.Devin Akin. Wi-Fi throughput. *By Devin Akin*. URL: <https://divdyn.com/wi-fi-throughput/>.

23. N. S. Ravindranath et al. Performance evaluation of IEEE 802.11ac and 802.11n using NS3. *Indian journal of science and technology*. 2016. Vol. 9, no. 26. URL: <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i26/93565> (date of access: 22.10.2024).
24. Lopez-Aguilera E., Garcia-Villegas E., Casademont J. Evaluation of IEEE 802.11 coexistence in WLAN deployments. *Wireless networks*. 2017. Vol. 25, no. 1. P. 87–104. URL: <https://doi.org/10.1007/s11276-017-1540-z/>
25. Varun P. Sarvade; S. A. Kulkarni. Performance analysis of IEEE 802.11ac for vehicular networks using realistic traffic scenarios. 2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Udupi, India, 13-16 September 2017. 2017. URL: <https://DOI:10.1109/ICACCI.2017.8125830>
26. Lazebnyi V. S., Yin C. Estimation of probabilistic processes in wireless networks of 802.11 standard. *Microsystems, electronics and acoustics*. 2017. Vol. 22, no. 5. P. 47–53. URL: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2017.22.5.99947>.
27. Yazid M., Ksentini A. Modeling and performance analysis of the main MAC and PHY features of the 802.11ac standard: A-MPDU aggregation vs spatial multiplexing. *IEEE transactions on vehicular technology*. 2018. Vol. 67, no. 11. P. 10243–10257. URL: <https://doi.org/10.1109/tvt.2018.2870127>.
28. C. Ramakristanaiah, P. Chenna Reddy, R. Praveen Sam. Analysis of starvation problem in wireless lans. *IJCTA*. 2015. Vol. 8 (5). P. 1783–1792.
29. T. Vanhatupa. Wi-Fi capacity analysis for 802.11ac and 802.11n: Theory&practice. Ekahau, 2015. 21 p. URL: https://www.ekahau.com/wp-content/uploads/2020/06/Wi-Fi_Capacity_Analysis_WP.pdf.
30. Zeng Y., Pathak P. H., Mohapatra P. A first look at 802.11ac in action: energy efficiency and interference characterization. *2014 IFIP networking conference*, Trondheim, Norway, 2–4 June 2014. 2014. URL: <https://doi.org/10.1109/ifipnetworking.2014.6857103>.

31. Supporting throughput fairness in IEEE 802.11ac dynamic bandwidth channel access: a hybrid approach / K. Ayush et al. *2017 IEEE 42nd conference on local computer networks (LCN)*, Singapore, 9–12 October 2017. 2017. URL: <https://doi.org/10.1109/lcn.2017.93>.
32. Tips For Improving Your WiFi Network Performance. URL: <https://www.itjones.com/blogs/tips-for-improving-your-wifi-network-performance>
33. Khalil N., Najid A. Performance analysis of 802.11ac with frame aggregation using NS3. *International journal of electrical and computer engineering (IJECE)*. 2020. Vol. 10, no. 5. P. 5368. URL: <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i5.pp5368-5376>.
34. Howard. Why and how to implement Wi-Fi QoS? *FS Community*. URL: <https://community.fs.com/article/why-and-how-to-implement-wifi-qos.html>.
35. Yuri Svitlyk. VoWiFi i VoLTE: що це таке і як їх включити. URL: <https://root-nation.com/ua/soft-ua/howto-ua/ua-vowifi-volte/>
36. Wireless VoIP QoS best practices. *Cisco Meraki Documentation*. URL: https://documentation.meraki.com/Architectures_and_Best_Practices/Cisco_Meraki_Best_Practice_Design/Best_Practice_Design_%20MR_Wireless/Wireless_VoIP_QoS_Best_Practices.
37. Joe Manna. What is VoIP QoS and how does it improve call quality? *Nextiva Blog*. URL: <https://www.nextiva.com/blog/voip-qos.html>.
38. Network Latency - Common Causes and Best Solutions. URL: <https://www.ir.com/guides/what-is-network-latency>
39. Andrews D. VoIP vs. VoWiFi: Comparing Benefits & Highlighting Differences. *Calilio: The Modern Business Phone System*. URL: <https://www.calilio.com/blogs/voip-vs-vowifi-comparison-differences>.
40. How Your WiFi Band Impacts Low Latency Connections. URL: <https://parsec.app/blog/how-your-wifi-band-impacts-low-latency-connections-9f1e538a63dd>

41. Why Wi-Fi is complicated: Wi-Fi Signal Issues. *Accolade Blog*.
URL: <https://www.accoladewireless.com/wlan-wifi-signal-issues/>.
42. Wavlink. Wi-Fi signal attenuation – king of connection. *News of technical*.
URL: <https://blog.wavlink.com/en-us/article/TechnicalNews/92442c2444eaa02541dd27fe90bed782.html>.
43. Danielsen J. Which building materials can block wi-fi signals? *Eye networks*.
URL: <https://eyenetworks.no/sa-mye-taper-wifi-signalene-seg-pa-vei-gjennom-veggen/>.
44. Dhawankar P., Le-Minh H., Aslam N. Throughput and range performance investigation for IEEE 802.11a, 802.11n and 802.11ac technologies in an on-campus heterogeneous network environment. *2018 11th International symposium on communication systems, networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, Budapest, 18–20 July 2018. 2018.
URL: <https://doi.org/10.1109/csndsp.2018.8471865>.
45. Adolfo_Z_H. Technical tip: Real world WIFI performance. *Fortinet Community*. URL: <https://community.fortinet.com/t5/FortiAP/Technical-Tip-Real-world-WIFI-performance/ta-p/246664>.
46. Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE journal on selected areas in communications*. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547. URL: <https://doi.org/10.1109/49.840210>.
47. Emerging technologies in wireless LANs: Theory, design, and deployment / ed. by B. Benny. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 853 p.
48. Performance analysis of IEEE 802.11ac wireless backhaul networks in saturated conditions / R. Liao et al. *EURASIP journal on wireless communications and networking*. 2013. No. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2013-226>.
49. Lazebnyy A. V., Lazebnyy V. S. The details of virtual contention window concept for 802.11 IBSS wireless local area network mathematic modeling. *International journal of wireless communications and mobile computing*. 2013. Vol. 1, no. 1. P. 7.
URL: <https://doi.org/10.11648/j.wcmc.20130101.12>.

- 50.Shadey. ACK Timeouts and the effects on distance links. *Air-Stream Wireless Inc.* URL: https://air-stream.org/ACK_Timeouts/.
- 51.Omelianets O. O., Lazebnyi V. S. Evaluation of the limitation of operational parameters of the IEEE 802.11 ac network in the 20mhz channel. *Мікросистеми, електроніка і акустика*. 2024. Vol. 29, no. 1. URL: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.297580>.
- 52.Омельянець О. Оцінювання експлуатаційних характеристик мережі IEEE 802.11ac з каналом 20 МГц. *Ricerche scientifiche e metodi della loro realizzazione: esperienza mondiale e realtà domestiche*, м. Болонья, 26 квіт. 2024 р. / Наук. керівник В. Лазебний. 2024. С. 221–230. URL: <https://doi.org/10.36074/logos-26.04.2024.046>.
- 53.Лазебний В. С., Пілінський В. В., Швайченко В. Б. Електромагнітна сумісність електронних пристроїв: Навчальний посібник. Київ: Київський політехнічний інститут ім.Ігоря Сікорського, 2023. 343 с.
- 54.Безпроводові технології: MU-MIMO. *Енциклопедія Lanmarket*. URL: https://lanmarket.ua/entsiklopediya/besprovodnye-tekhnologii/mu_mimo.html.
- 55.Munshi A. Design, Simulation and Evaluation of SISO/MISO/MIMO-OFDM Systems. *International journal of latest technology in engineering, management & applied science (IJLTEMAS)*. 2017. Vol. 6, no. 3rd Special Issue on Engineering and Technology. P. 63–66. URL: https://www.researchgate.net/publication/320394757_Design_Simulation_and_Evaluation_of_SISOMISOMIMO-OFDM_Systems.
- 56.MIMO, And The Potential Challenges. URL: <https://www.mobilemark.com/engineering/mimo-and-the-potential-challenges/>
- 57.Salama A., Saatchi R. Quality of service in IEEE 802.11ac and 802.11n wireless protocols with applications in medical environments. *Advances in asset management and condition monitoring*. Cham, 2020. P. 1345–1358. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57745-2_111.

- 58.Lichtman M. DOA and beamforming. *PySDR: A guide to SDR and DSP using Python*: Electronic guide. URL: <https://pysdr.org/index.html>.
- 59.Technical guides: What are 802.11ac and 802.11ac wave 2. *Huawei Enterprise*. URL: <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100081215>.
- 60.Papavero M. What is MUMIMO and why is needed it? A technical guide for 2022. *MUMIMO Technology Explained*. URL: <https://www.tanaza.com/blog/mumimo-technology-explained/>.
- 61.Лазебний В. С., Омельянець О. О. Електромагнітна сумісність безпроводових мереж IEEE 802.11ac. *Technologies and engineering*. 2023. № 1 (18). С. 67–76. URL: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.1.7>.
- 62.What is a VoIP Phone? URL: <https://www.zoom.com/en/products/voip-phone/resources/what-is-a-voip-phone/>
- 63.Epstein J. 5 Ways to Troubleshoot WiFi Issues with VoIP. *Telzio: Business Phone Systems in the Cloud*. URL: <https://telzio.com/blog/5-ways-troubleshoot-wifi-voip>.
- 64.Noworatzky D. How to optimize your Wi-Fi network for VoIP. *Teledynamics think tank*. URL: <https://info.teledynamics.com/blog/how-to-optimize-your-wi-fi-network-for-voip>.
- 65.Rafael Estepa, Mark Davis, Vicente Mayor, Antonio Estepa. Supporting VoIP communication in IEEE 802.11ax networks: A new admission control and scheduling resource allocation scheme. *Computer Communications*. 2024. Vol. 224. P. 225-241. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2024.06.010>
- 66.IP/VoIP analysis and simulation: Voice codecs. *GL Communications Inc. Telecommunication products and consulting services*. URL: <https://www.gl.com/voice-codecs.html>.
- 67.Noworatzky D. The wonderful world of voice codecs. *Teledynamics think tank*. URL: <https://info.teledynamics.com/blog/the-wonderful-world-of-voice-codecs>.

- 68.Codec for Enhanced Voice Services (EVS)– The New 3GPP Codec for Communication / S. Bruhn et al. *Audio Engineering Society - AES*. URL: <https://www.aes.org/technical/documentDownloads.cfm?docID=548>.
- 69.Himanshu Arora. IP protocol header fundamentals explained with diagrams. *The Geek Stuff*. URL: <https://www.thegeekstuff.com/2012/03/ip-protocol-header>.
- 70.Alyssa Lamberti. Implementing QoS for VoIP for Exceptional VoIP Call Quality. URL: <https://obkio.com/blog/qos-for-voip/>
- 71.Lazebnyi V. S., Omelyanets O. O. Features of voice traffic transmission using IEEE 802.11ac wireless networks. *Radiotekhnika*. 2024. No. 216. P. 94–102. URL: <https://doi.org/10.30837/rt.2024.1.216.09>.
- 72.Омельянець О. О., Лазебний В. С. Особливості застосування безпроводових мереж IEEE 802.11ac для передавання голосового трафіка. *Collection of scientific papers «SCIENTIA»*, м. Піза, 26 квіт. 2024 р. 2024. С. 100–107. URL: <https://previous.scientia.report/index.php/archive/article/view/1777>.
- 73.[OpenWrt Wiki] Welcome to the OpenWrt Project. URL: <https://openwrt.org/>
74. WiFi Analyzer (open-source). URL: https://play.google.com/store/apps/details/WiFiAnalyzer_open_source?id=com.vrem.wifianalyzer&hl=uk
- 75.Український SPEEDTEST - Тест швидкості Інтернет з'єднання. URL: <https://speedtest.net.ua/>
- 76.Налаштування Кодеків для Telegram-дзвінків. URL: <https://www.sip.tg/uk/docs/codecs>

Додаток А

Результати розрахунку пропускної здатності безпроводового каналу мережі

IEEE 802.11ac з частотною смугою 20 МГц

Таблиця А.1 – Тривалість циклу реалізації віртуального конкурентного вікна
залежно від кількості активних станцій (N) з насиченим навантаженням,
корисне навантаження кадру 512 байтів

N	T _{VCW} , мкс									
	MCS 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Δf=20, МГц									
	BPSK, 1/2	QPSK, 1/2	QPSK, 3/4	QAM-16, 1/2	QAM-16, 3/4	QAM-64, 2/3	QAM-64, 3/4	QAM-64, 5/6	QAM-256, 3/4	QAM-256, 5/6
2	1867,054	1195,054	971,0545	859,0545	747,0545	691,0545	675,0545	659,0545	623,8545	
4	3696,009	2352,009	1904,009	1680,009	1456,009	1344,009	1312,009	1280,009	1209,609	
6	5557,057	3541,057	2869,057	2533,057	2197,057	2029,057	1981,057	1933,057	1827,457	
8	7456,194	4768,194	3872,194	3424,194	2976,194	2752,194	2688,194	2624,194	2483,394	
10	9397,689	6037,689	4917,689	4357,689	3797,689	3517,689	3437,689	3357,689	3181,689	
12	11384,15	7352,151	6008,151	5336,151	4664,151	4328,151	4232,151	4136,151	3924,951	
14	13416,95	8712,949	7144,949	6360,949	5576,949	5184,949	5072,949	4960,949	4714,549	
16	15496,51	10120,51	8328,51	7432,51	6536,51	6088,51	5960,51	5832,51	5550,91	
	Δf=40, МГц									
2	1171,054	851,0545	739,0545	691,0545	635,0545	611,0545	601,0545	595,0545	579,0545	573,8545
4	2304,009	1664,009	1440,009	1344,009	1232,009	1184,009	1164,009	1152,009	1120,009	1109,609
6	3469,057	2509,057	2173,057	2029,057	1861,057	1789,057	1759,057	1741,057	1693,057	1677,457
8	4672,194	3392,194	2944,194	2752,194	2528,194	2432,194	2392,194	2368,194	2304,194	2283,394
10	5917,689	4317,689	3757,689	3517,689	3237,689	3117,689	3067,689	3037,689	2957,689	2931,689
12	7208,151	5288,151	4616,151	4328,151	3992,151	3848,151	3788,151	3752,151	3656,151	3624,951
14	8544,949	6304,949	5520,949	5184,949	4792,949	4624,949	4554,949	4512,949	4400,949	4364,549
16	9928,51	7368,51	6472,51	6088,51	5640,51	5448,51	5368,51	5320,51	5192,51	5150,91
	Δf=80, МГц									
2	827,0545	675,0545	627,0545	603,0545	579,0545	563,0545	563,0545	555,0545	555,0545	547,0545
4	1616,009	1312,009	1216,009	1168,009	1120,009	1088,009	1088,009	1072,009	1072,009	1056,009
6	2437,057	1981,057	1837,057	1765,057	1693,057	1645,057	1645,057	1621,057	1621,057	1597,057

Продовження табл.А.1

8	3296,194	2688,194	2496,194	2400,194	2304,194	2240,194	2240,194	2208,194	2208,194	2176,194
10	4197,689	3437,689	3197,689	3077,689	2957,689	2877,689	2877,689	2837,689	2837,689	2797,689
12	5144,151	4232,151	3944,151	3800,151	3656,151	3560,151	3560,151	3512,151	3512,151	3464,151
14	6136,949	5072,949	4736,949	4568,949	4400,949	4288,949	4288,949	4232,949	4232,949	4176,949
16	7176,51	5960,51	5576,51	5384,51	5192,51	5064,51	5064,51	5000,51	5000,51	4936,51

Таблиця А.2 – Пропускна здатність одного просторового каналу безпроводової мережі IEEE802.11ac залежно від ширини частотної смуги і способу модуляції й кодування (MCS), з корисним навантаженням кадру 512 байтів

N	S, Мбіт/с									
	MCS0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$\Delta f=20$, МГц									
2	4,388	6,855	8,436	9,536	10,965	11,854	12,135	12,429	13,131	
4	4,433	6,966	8,604	9,752	11,252	12,190	12,487	12,799	13,544	
6	4,421	6,937	8,562	9,698	11,181	12,106	12,400	12,707	13,442	
8	4,385	6,856	8,443	9,547	10,985	11,878	12,161	12,458	13,164	
10	4,327	6,734	8,268	9,331	10,707	11,558	11,827	12,109	12,779	
12	4,243	6,570	8,040	9,052	10,356	11,160	11,413	11,678	12,306	
14	4,131	6,361	7,757	8,713	9,938	10,688	10,924	11,171	11,755	
16	3,988	6,107	7,421	8,316	9,456	10,151	10,369	10,596	11,134	
	$\Delta f=40$, МГц									
2	6,995	9,626	11,084	11,854	12,899	13,406	13,629	13,766	14,147	14,275
4	7,111	9,846	11,377	12,190	13,298	13,837	14,075	14,221	14,628	14,765
6	7,081	9,791	11,304	12,107	13,199	13,730	13,964	14,109	14,509	14,644
8	6,997	9,638	11,104	11,879	12,931	13,441	13,666	13,804	14,188	14,317
10	6,871	9,417	10,821	11,559	12,558	13,041	13,254	13,385	13,747	13,869
12	6,701	9,134	10,464	11,160	12,099	12,552	12,751	12,873	13,211	13,325
14	6,486	8,791	10,038	10,689	11,563	11,983	12,167	12,280	12,593	12,698
16	6,225	8,388	9,549	10,151	10,957	11,343	11,512	11,616	11,903	11,999
	$\Delta f=80$, МГц									
2	9,905	12,135	13,064	13,584	14,147	14,549	14,549	14,758	14,758	14,974
4	10,138	12,487	13,473	14,027	14,628	15,058	15,058	15,283	15,283	15,514
6	10,080	12,400	13,372	13,918	14,509	14,932	14,932	15,153	15,153	15,381
8	9,918	12,161	13,097	13,621	14,188	14,593	14,593	14,805	14,805	15,022
10	9,686	11,828	12,716	13,211	13,747	14,129	14,129	14,328	14,328	14,533
12	9,390	11,413	12,247	12,711	13,211	13,567	13,567	13,753	13,753	13,943
14	9,031	10,925	11, 700	12,130	12,593	12,921	12,921	13,092	13,092	13,268
16	8,612	10,369	11,083	11,479	11,903	12,203	12,203	12,360	12,360	12,520

Таблиця А.3 – Тривалість циклу передавання одного кадру корисної інформації (512 байтів) без урахування інтервалу зворотного відліку випадкової затримки (CW), захисний інтервал 0,4 мкс

Δf , МГц	MCS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	$T_{ц_к}$, мкс	895	559	447	391	335	307	299	291	273,4	
40		547	387	331	307	279	267	262	259	251	248,4
80		375	299	275	263	251	243	243	239	239	235

Таблиця А.4 – Тривалість циклу передавання одного кадру корисної інформації (1500 байтів) без урахування інтервалу зворотного відліку випадкової затримки (CW), захисний інтервал 0,4 мкс

Δf , МГц	MCS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	$T_{ц_к}$, мкс	2111	1167	855	695	539	459	435	415	367	
40		1131	679	527	451	375	339	327	315	299	295
80		643	435	363	331	295	279	271	267	259	255

Таблиця А.5 – Тривалість циклу реалізації віртуального конкурентного вікна
залежно від кількості активних станцій (N) з насиченим навантаженням,
корисне навантаження кадру 1500 байтів

N	T _{VCW} , мкс									
	MCS 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$\Delta f=20$, МГц									
	BPSK, 1/2	QPSK, 1/2	QPSK, 3/4	QAM-16, 1/2	QAM-16, 3/4	QAM-64, 2/3	QAM-64, 3/4	QAM-64, 5/6	QAM-256, 3/4	QAM-256, 6/6
2	4299,054	2411,054	1787,054	1467,054	1155,054	995,0545	947,0545	907,0545	811,0545	
4	8560,009	4784,009	3536,009	2896,009	2272,009	1952,009	1856,009	1776,009	1584,009	
6	12853,06	7189,057	5317,057	4357,057	3421,057	2941,057	2797,057	2677,057	2389,057	
8	17184,19	9632,194	7136,194	5856,194	4608,194	3968,194	3776,194	3616,194	3232,194	
10	21557,69	12117,69	8997,689	7397,689	5837,689	5037,689	4797,689	4597,689	4117,689	
12	25976,15	14648,15	10904,15	8984,151	7112,151	6152,151	5864,151	5624,151	5048,151	
14	30440,95	17224,95	12856,95	10616,95	8432,949	7312,949	6976,949	6696,949	6024,949	
16	34952,51	19848,51	14856,51	12296,51	9800,51	8520,51	8136,51	7816,51	7048,51	
N	$\Delta f=40$, МГц									
	2	4	6	8	10	12	14	16		
	2339,054	1435,054	1131,054	979,0545	827,0545	755,0545	731,0545	707,0545	675,0545	667,0545
	4640,009	2832,009	2224,009	1920,009	1616,009	1472,009	1424,009	1376,009	1312,009	1296,009
6	6973,057	4261,057	3349,057	2893,057	2437,057	2221,057	2149,057	2077,057	1981,057	1957,057
8	9344,194	5728,194	4512,194	3904,194	3296,194	3008,194	2912,194	2816,194	2688,194	2656,194
10	11757,69	7237,689	5717,689	4957,689	4197,689	3837,689	3717,689	3597,689	3437,689	3397,689
12	14216,15	8792,151	6968,151	6056,151	5144,151	4712,151	4568,151	4424,151	4232,151	4184,151
14	16720,95	10392,95	8264,949	7200,949	6136,949	5632,949	5464,949	5296,949	5072,949	5016,949
16	19272,51	12040,51	9608,51	8392,51	7176,51	6600,51	6408,51	6216,51	5960,51	5896,51
N	$\Delta f=80$, МГц									
	2	4	6	8	10	12	14	16		
	1363,054	947,0545	803,0545	739,0545	667,0545	635,0545	619,0545	611,0545	595,0545	587,0545
	2688,009	1856,009	1568,009	1440,009	1296,009	1232,009	1200,009	1184,009	1152,009	1136,009
6	4045,057	2797,057	2365,057	2173,057	1957,057	1861,057	1813,057	1789,057	1741,057	1717,057
8	5440,194	3776,194	3200,194	2944,194	2656,194	2528,194	2464,194	2432,194	2368,194	2336,194
10	6877,689	4797,689	4077,689	3757,689	3397,689	3237,689	3157,689	3117,689	3037,689	2997,689
12	8360,151	5864,151	5000,151	4616,151	4184,151	3992,151	3896,151	3848,151	3752,151	3704,151
14	9888,949	6976,949	5968,949	5520,949	5016,949	4792,949	4680,949	4624,949	4512,949	4456,949
16	11464,51	8136,51	6984,51	6472,51	5896,51	5640,51	5512,51	5448,51	5320,51	5256,51

Таблиця А.6 – Пропускна здатність одного просторового каналу безпроводової мережі IEEE802.11ac з насиченим навантаженням залежно від ширини частотної смуги, кількості станцій (N) і способу модуляції й кодування (MCS), з корисним навантаженням кадру 1500 байтів

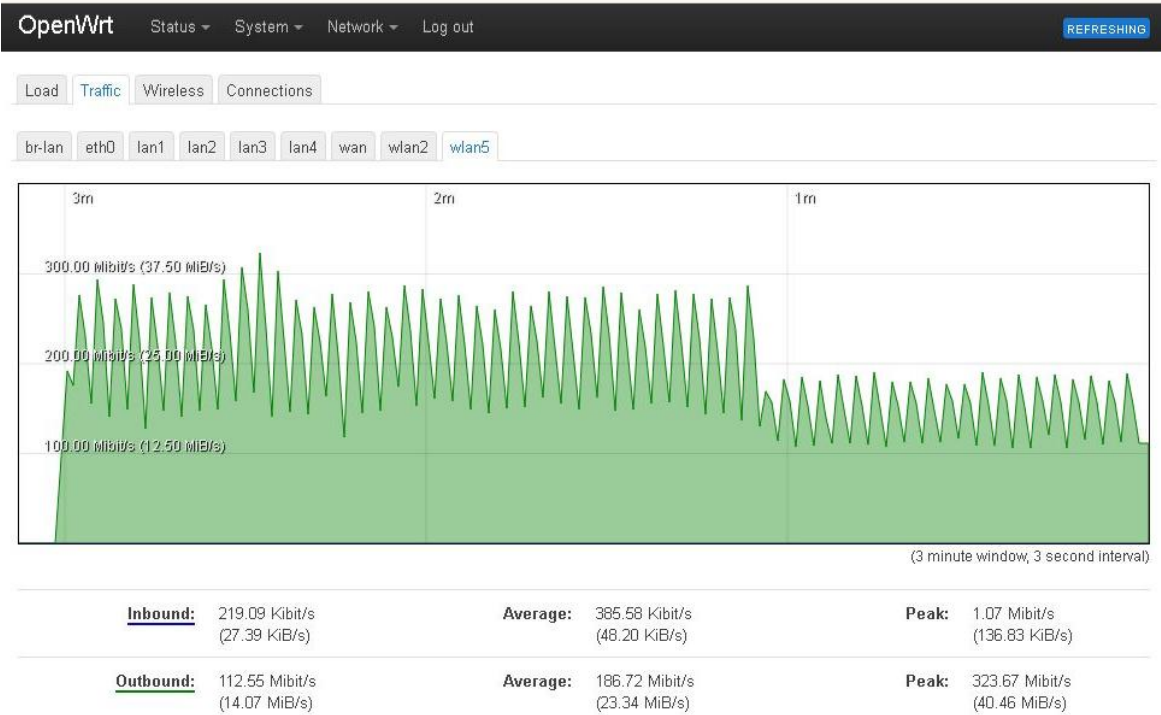
N	S, Мбіт/с									
	MCS0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$\Delta f=20$, МГц									
2	5,582	9,954	13,429	16,359	20,778	24,119	25,341	26,459	29,591	
4	5,607	10,033	13,574	16,574	21,126	24,589	25,861	27,026	30,301	
6	5,599	10,011	13,535	16,517	21,036	24,470	25,730	26,883	30,124	
8	5,573	9,943	13,421	16,355	20,784	24,136	25,363	26,486	29,632	
10	5,525	9,830	13,239	16,102	20,405	23,646	24,829	25,909	28,929	
12	5,447	9,661	12,978	15,751	19,897	23,002	24,132	25,162	28,033	
14	5,333	9,426	12,628	15,293	19,253	22,202	23,271	24,244	26,949	
16	5,180	9,122	12,188	14,725	18,476	21,251	22,254	23,165	25,689	
	$\Delta f=40$, МГц									
2	10,260	16,724	21,219	24,513	29,018	31,785	32,829	33,943	35,552	35,979
4	10,344	16,948	21,582	24,999	29,701	32,607	33,706	34,882	36,584	37,035
6	10,320	16,889	21,489	24,876	29,530	32,402	33,488	34,649	36,328	36,773
8	10,250	16,720	21,226	24,532	29,057	31,839	32,888	34,009	35,629	36,058
10	10,131	16,458	20,834	24,027	28,378	31,040	32,042	33,110	34,651	35,059
12	9,954	16,095	20,308	23,367	27,510	30,032	30,978	31,987	33,438	33,821
14	9,710	15,622	19,645	22,547	26,457	28,824	29,710	30,652	32,006	32,363
16	9,395	15,038	18,845	21,575	25,231	27,433	28,255	29,128	30,379	30,708
	$\Delta f=80$, МГц									
2	17,607	25,341	29,885	32,473	35,979	37,792	38,768	39,276	40,332	40,882
4	17,856	25,861	30,611	33,332	37,035	38,959	39,998	40,539	41,665	42,251
6	17,791	25,730	30,429	33,118	36,773	38,670	39,694	40,226	41,335	41,913
8	17,605	25,363	29,928	32,531	36,058	37,884	38,868	39,379	40,443	40,997
10	17,320	24,829	29,213	31,700	35,059	36,792	37,724	38,208	39,214	39,738
12	16,927	24,132	28,302	30,656	33,821	35,448	36,321	36,775	37,715	38,204
14	16,419	23,271	27,201	29,409	32,363	33,876	34,686	35,106	35,978	36,430
16	15,794	22,254	25,925	27,975	30,708	32,102	32,847	33,233	34,033	34,447

Таблиця А.7 – Характеристики успішних спроб передавання кадру на різних етапах доступу до каналу з шириною частотної смуги 20 МГц в режимі MCS8

N	2	4	6	8	10	12	14	16
j	N_j							
1	1,875	3,296	4,3452	5,092	5,6	5,9004	6,0494	6,0768
2	0,117187	0,580096	1,198406	1,850942	2,464	2,999173	3,435454	3,768831
3	0,007324	0,102096	0,330520	0,672817	1,08416	1,524499	1,950994	2,337429
4	0,000457	0,0179690	0,091157	0,244569	0,477030	0,774893	1,10797	1,449677
5	2,861E-05	0,0031625	0,025141	0,088901	0,209893	0,393878	0,629216	0,899088
6	1,7881E-06	0,0005566	0,006934	0,032315	0,092353	0,200208	0,357332	0,557614
7	1,1176E-07	9,7963E-05	0,001913	0,011747	0,040635	0,101766	0,202929	0,345832
Σ	1,999999	3,9999790	5,999272	7,993292	9,968072	11,89479	13,7333	15,435268

Додаток Б

Довідкова інформація про експериментальні засоби



a)



б)

Рисунок Б.1 – Екранне меню функції «графіки навантаження»: а – тривалість передавання даних більше тривалості вікна; б – тривалість передавання – менше

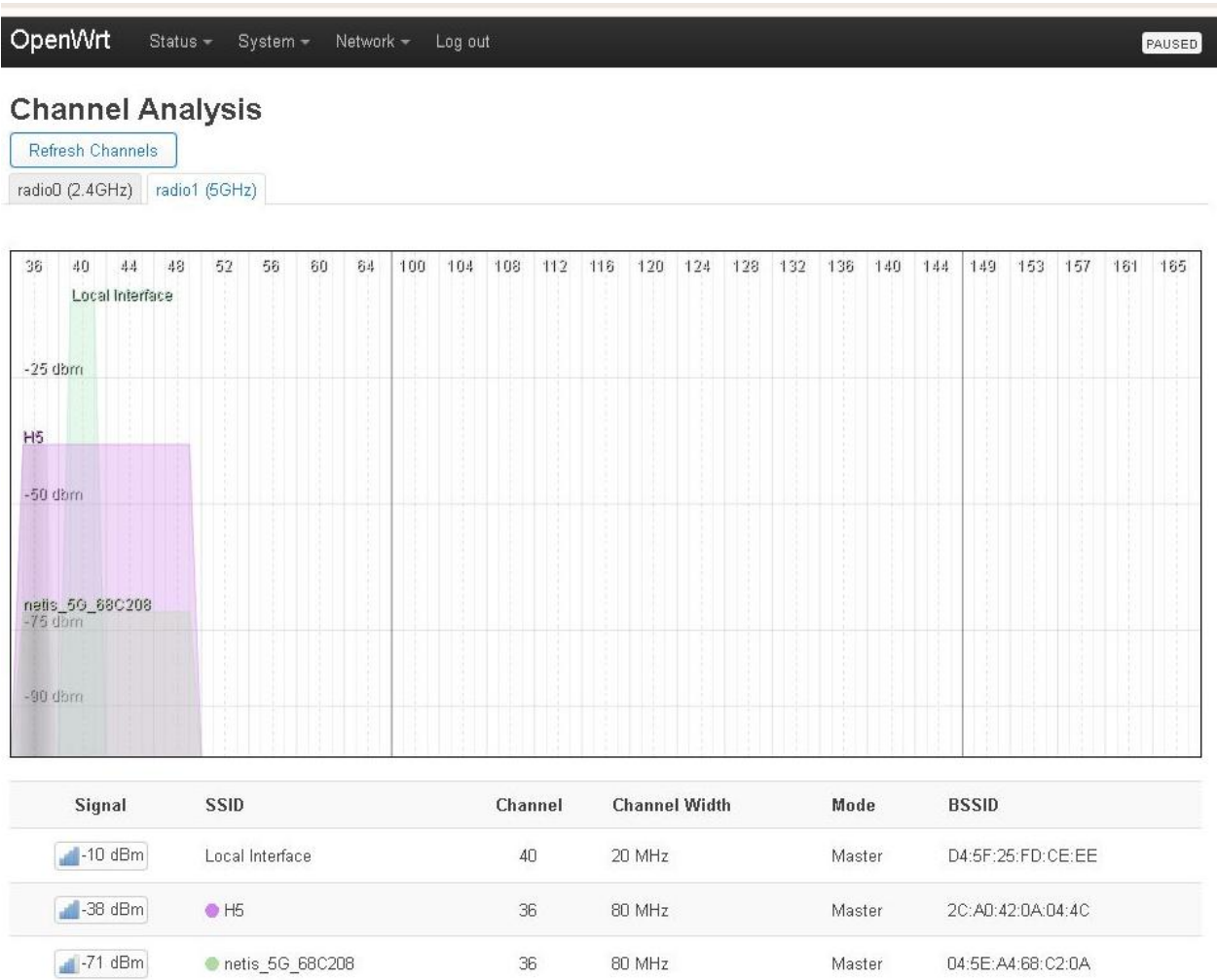


Рисунок Б.2 – Екранна інформація функції «аналіз характеристик каналів»

OpenWrt Status System Network Log out REFRESH

Wireless Network: Access Point "BH5" (wlan5)

Device Configuration

General Setup Advanced Settings

Status Mode: Master | SSID: BH5
BSSID: D4:5F:25:FD:CE:EE
Encryption: WPA2 PSK (CCMP)
Channel: 36 (5.180 GHz)
Tx Power: 20 dBm
Signal: 0 dBm | Noise: 0 dBm
Bitrate: 0.0 Mbit/s | Country: UA

Wireless network is enabled

Operating frequency Mode: AC Channel: auto Width: 20 MHz

Maximum transmit power driver default - Current power: 20 dBm

Specifies the maximum transmit power the wireless radio may use. Depending on regulatory requirements and wireless usage, the actual transmit power may be reduced by the driver.

Interface Configuration

General Setup Wireless Security MAC-Filter Advanced Settings WLAN roaming

Mode: Access Point

ESSID: BH5

Network: lan:

Choose the network(s) you want to attach to this wireless interface or fill out the *custom* field to define a new network.

Hide ESSID: ☐

Where the ESSID is hidden, clients may fail to roam and airtime efficiency may be significantly reduced.

WMM Mode: ☒

Where Wi-Fi Multimedia (WMM) Mode QoS is disabled, clients may be limited to 802.11a/802.11g rates.

Рисунок Б.3 – Інтерфейс конфігурування ТД МТ76х2Е 802.11 ас/п



а)

б)

Рисунок Б.4 – Зовнішній вигляд точки доступу HUAWEI WiFi WS5200 (ТД2):

а – вид спереду, б – задня панель приладу

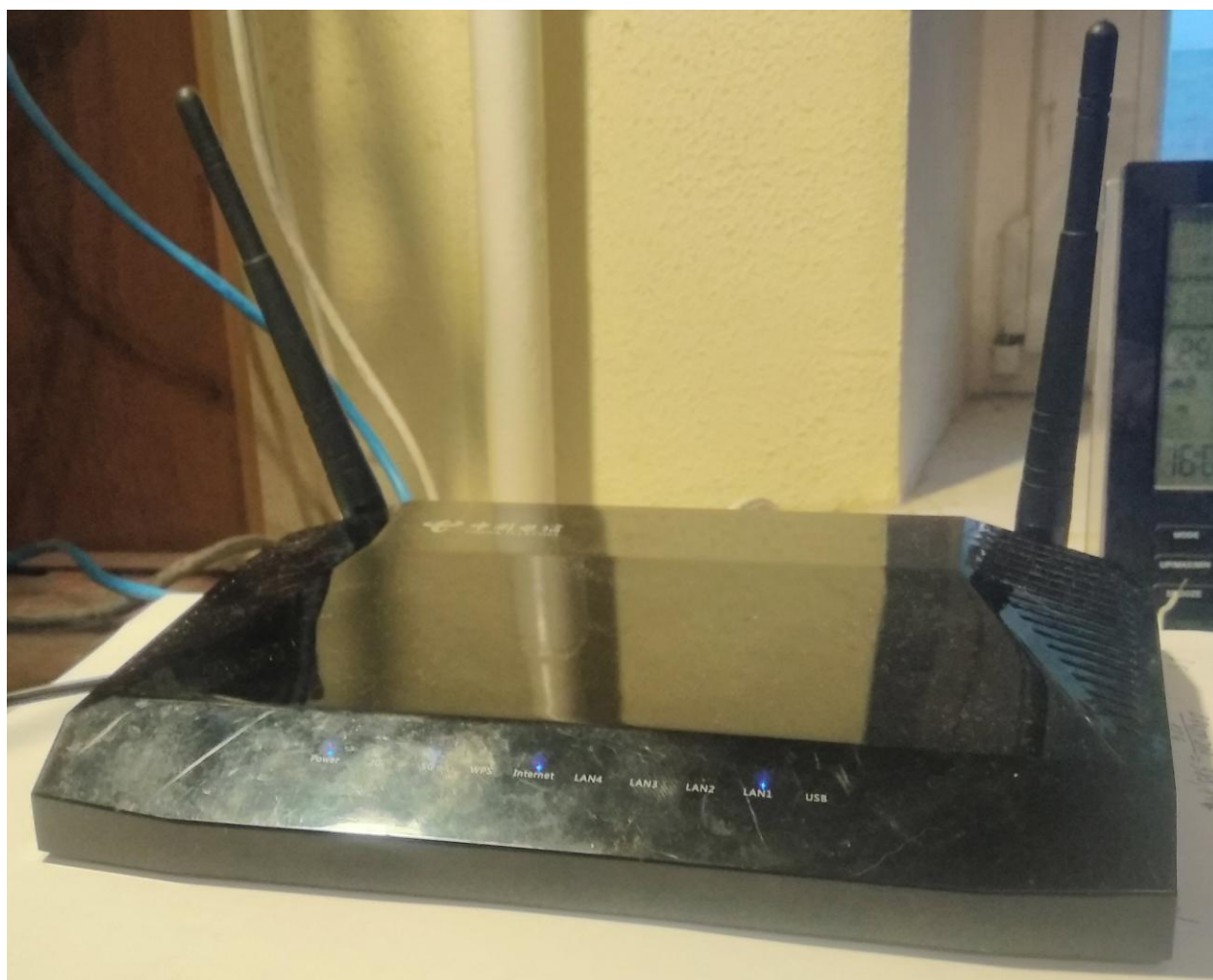


Рисунок Б.5 – Зовнішній вигляд точки доступу MT76x2E 802.11 ac/n (ТД1)