

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

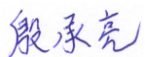
**ІНЬ ЧЕНЛЯН**

УДК 004.7:654.195.6

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

05.13.05 - Комп'ютерні системи та компоненти

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання  
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне  
джерело  Ч. Інъ

Науковий керівник  
**Лазебний Володимир Семенович,**  
кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2019

## АНОТАЦІЯ

*Інь Ч.* Дослідження та розроблення методики оцінювання ефективності передавання аудіовізуальної інформації засобами безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп’ютерні системи та компоненти. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України. – Національний авіаційний університет Міністерства освіти і науки України, Київ, 2019.

Метою дисертаційного дослідження є з’ясувати особливості сучасних підходів до оцінювання і прогнозування експлуатаційних характеристик безпроводових мереж IEEE 802.11, удосконалити зазначену методику оцінювання та оцінити ефективність застосування безпроводових мереж для передавання аудіовізуального контенту.

Основним завданням дисертаційної роботи є розроблення методики оцінювання граничних можливостей безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11 щодо передавання аудіовізуальної інформації для забезпечення необхідного рівня якісних показників на етапах проектування та експлуатації.

Безпроводові локальні мережі стандарту IEEE 802.11 (Wi-Fi) набули значного поширення для передавання головним чином мультимедійної інформації. Їх застосовують як корпоративні користувачі, так і індивідуальні користувачі. Великого поширення набули безпроводові мережі доступу до інформаційних ресурсів в місцях великого скупчення людей.

Розвитку безпроводових мереж сприяє те, що сучасні мобільні засоби зв’язку (телефони та планшети), а також портативні комп’ютери мають можливість з’єднання з мережею Інтернет із застосуванням радіоканалу Wi-Fi. Технологію мереж Wi-Fi постійно вдосконалюють і вона забезпечує все більшу пропускну здатність потоків даних.

У процесі експлуатації мереж стандарту IEEE 802.11 часто виникають

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

Проаналізовано основні принципи функціонування безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11 та особливості функціонування мереж в частотних діапазонах 2,4 та 5 ГГц, розглянуто особливості функціонування мереж за умов їх значного поширення, узагальнено відомі результати випробувань пропускну здатності безпроводових мереж. Зазначено, що більшість мереж функціонують у режимі конкурентного доступу до середовища передавання. Режим конкурентного доступу (DCF) є обов'язковим для всіх специфікацій стандарту.

Проаналізовано дві методики оцінювання експлуатаційних характеристик безпроводових мереж IEEE 802.11. Одна методика, що ґрунтується на концепції часового слота (запропонована Джузеппе Б'янкі), та друга методика, що ґрунтується на концепції віртуального конкурентного вікна. Обидві методики призначено для оцінювання граничних значень експлуатаційних параметрів мережі в режимі насиченого навантаження. Це режим, за якого всі станції мережі постійно конкурують за канал для передавання кадрів даних. Такий режим має місце у процесі передавання аудіовізуальної інформації.

Для забезпечення режиму конкурентного доступу використовують розподілену функцію координації. Доступ може бути реалізований або в режимі безпосередньої конкуренції, або із застосуванням додаткових кадрів керування RTS/CTS.

Сформовано удосконалену математичну модель передавання інформаційних потоків для обох режимів конкурентного доступу до каналу. Модель сформовано на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна, згідно з якою процес передавання інформаційних кадрів розглянуто як

квазістаціонарний випадковий процес.

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

Досліджено процес виникнення колізій і отримано розрахункові співвідношення для квазістаціонарного режиму. Обґрунтовано, що через виникнення колізій число станцій, які конкурують за доступ до радіоканалу, менше загального числа активних станцій в мережі. Наведено графіки залежності кількості станцій, що конкурують за канал, залежно від кількості активних станцій в мережі і обґрунтовано спосіб розрахунку. Отримано співвідношення для визначення загальної ймовірності виникнення колізій в мережі із застосуванням співвідношень комбінаторики.

Отримано оцінку ймовірності успішного передавання для мережі з насиченим навантаженням у разі застосування механізму повторного передавання кадрів. У разі, якщо передбачено до шести повторів ймовірність успішного передавання пакету не менше 0,99 за умови, що кількість активних станцій не перевищує числа  $SW_{\min}$ .

Пропускну здатність безпроводового каналу з  $N$  активними станціями з насиченим навантаженням з урахуванням колізій, але без урахування завад та ослаблення сигналу через наявність перешкод, згідно з концепцією віртуального конкурентного вікна треба визначати як відношення загального обсягу корисного навантаження протягом інтервалу віртуального конкурентного вікна до тривалості цього інтервалу. Обґрунтовано математичне співвідношення для визначення тривалості інтервалу віртуального конкурентного вікна.

Теоретично досліджено експлуатаційні характеристики безпроводових мереж специфікацій IEEE 802.11a/n і визначено граничні можливості таких мереж залежно від кількості активних станцій та обсягів корисного навантаження в кадрах даних для обох режимів конкурентного доступу.

У разі використання протоколу TCP для передавання кадрів даних з корисним навантаженням від 64 до 1500 байтів пропускна здатність мережі змінюється від 1,52 Мбіт/с до 14,78 Мбіт/с, а в разі використання протоколу UDP – від 2,59 Мбіт/с до 17,8 Мбіт/с. У разі використання транспортного протоколу UDP розрахункова пропускна здатність каналу за наявності тільки однієї станції з насиченим навантаженням буде на 70% більше ніж у разі використання протоколу TCP для малих кадрів (корисне навантаження 64 байти) і на 20% – для великих (корисне навантаження 1500 байт).

Обґрунтовано, що середня затримка передавання кадру даних дорівнює тривалості інтервалу віртуального конкурентного вікна. Для визначення нерівномірності затримки (джитера) загальну формулу модифіковано з урахуванням значень імовірнісних експлуатаційних характеристик. У мережі IEEE 802.11a в режимі RTS/CTS в разі передавання кадрів з великим обсягом корисної інформації (1500 байтів) середня затримка змінюється від 1,5 мс (2 станції в мережі) до 11 мс (14 станцій в мережі), а нерівномірність затримки змінюється від 2 мс до 105 мс відповідно. У мережі IEEE 802.11n нерівномірність затримки в змішаному режимі в разі застосування кадрів RTS/CTS не перевищує 60 мс.

В дисертації наведено результати дослідження ефективності застосування мереж IEEE 802.11a/n для передавання аудіовізуальної інформації. Мережа IEEE 802.11a забезпечує надійне передавання голосового трафіка одночасно для великої кількості користувачів (не менше 14 активних абонентів на одну точку доступу) як у разі застосування системної швидкості 54 Мбіт/с, так і у разі застосування системної швидкості 24 Мбіт/с. Те саме стосується мережі 802.11 n, що функціонує в традиційному або змішаному режимі з одним просторовим каналом в частотній смузі 20 МГц в режимі із системною швидкістю 72 Мбіт/с.

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

станцію мережі. Мережа може забезпечити передавання до шести відеопотоків пониженої чіткості, кодованих за стандартом H.264.

Для перевірки адекватності удосконаленої математичної моделі процесу передавання інформації і методу оцінювання граничних експлуатаційних характеристик зроблено натурний експеримент. Порівняння отриманих під час випробувань значень пропускної здатності з прогнозованими значеннями свідчить про їх хорошу відповідність. Так, наприклад, розрахункове значення пропускної здатності каналу в разі функціонування двох станцій в насиченому режимі становить 55,158 Мбіт/с, а експериментально визначене 54,442 – 54,856 Мбіт/с. Розбіжність значень знаходиться в межах 1,3%. У разі великої кількості станцій розбіжність прогнозованих і отриманих у процесі експерименту значень пропускної здатності не перевищує 10%, що свідчить про адекватність запропонованої математичної моделі.

У процесі дисертаційних досліджень отримані нижченаведені наукові результати.

Удосконалено математичну модель процесу передавання інформаційних потоків у безпроводовій мережі IEEE 802.11 з конкурентним доступом у режимі насиченого навантаження на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна, що дозволяє розрахувати експлуатаційні характеристики мережі за наявності різної кількості активних станцій і різних обсягів корисного навантаження в кадрах даних.

Запропоновано метод оцінювання граничних значень експлуатаційних параметрів безпроводових мереж IEEE 802.11, що ґрунтується на застосуванні удосконаленої математичної моделі процесу передавання інформаційних потоків у безпроводовій мережі IEEE 802.11 з конкурентним доступом, для якого відсутні обмеження щодо величини ймовірності колізій.

Запропоновано метод оцінювання ефективності використання ресурсів безпроводових мереж IEEE 802.11 з конкурентним доступом із застосуванням коефіцієнта корисного навантаження у разі передавання аудіовізуальної інформації.

Практичне значення отриманих результатів полягає в нижченаведеному.

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

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

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

Отримані в дисертації уточнені оцінки інформаційних можливостей безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11 дозволять удосконалити алгоритм функціонування безпроводового каналу щодо врахування параметрів мережі та електромагнітної обстановки.

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

## SUMMARY

*Yin Ch.* Research and development of methodology for evaluating the transmission efficiency of audiovisual information by means of IEEE 802.11 wireless networks – Qualification scientific work printed as manuscript.

The Dissertation work for the Candidate's Degree of Technical Sciences on Specialty 05.13.05 – Computer systems and components. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine. – National Aviation University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The purpose of the dissertation is to find out the features of modern approaches to

the evaluation and forecasting of the performance of IEEE 802.11 wireless networks, to improve the specified methodology of evaluation and to evaluate the efficiency of the use of wireless networks for transmitting audiovisual content.

The main task of the dissertation is to develop a methodology for evaluating the critical capabilities of IEEE 802.11 wireless networks for the transmission of audiovisual information to provide the required level of quality indicators in the stages of design and operation.

IEEE 802.11 (Wi-Fi) wireless LANs have become widespread in the transmission of mainly multimedia information. They are used by both corporate and individual users. Wireless access to information resources in large crowded areas has become widespread.

The development of wireless networks is facilitated by the fact that modern mobile devices (phones and tablets), as well as laptops, have the ability to connect to the Internet using Wi-Fi. Wi-Fi technology is constantly being improved and it is providing more data throughput.

IEEE 802.11 networks are often overloaded or have problems with the quality of telecommunication and information services provided. This is due to the large number of active users connected to a single access point, as well as the fact that many users use services related to streaming information. Network problems can also occur due to the high density of wireless networks and their operation in the same or adjacent frequency channels.

The basic principles of functioning of IEEE 802.11 standard wireless networks and peculiarities of operation of networks in the frequency bands 2.4 and 5 GHz are analyzed, the peculiarities of functioning of networks under the conditions of their widespread distribution are considered, the known results of tests of the wireless network capacity is generalized. It is noted that most networks operate in competitive access to the broadcast environment. Competitive access mode (DCF) is mandatory for all specifications of the standard.

Two methods for evaluating the performance of IEEE 802.11 wireless networks are analyzed. One technique based on the concept of time slot (proposed by Giuseppe



Bianchi) and the second technique based on the concept of virtual contention window. Both techniques are designed to evaluate the limits of network operational parameters in saturated load mode. This is a mode in which all network stations constantly compete for a channel to transmit data frames. This mode takes place during the transmission of audiovisual information.

To ensure competitive access, the distributed coordination function is used. Access can be realized either in direct competition mode or with the use of additional RTS / CTS control frames.

An advanced mathematical model of flow transmission information for both modes of competitive access to the channel has been formed. The model is based on the concept of a virtual competitive window, according to which process of transferring information frames is considered as a quasi-stationary random process.

Virtual Competitive Window (VCW) is a stochastic parameter of Wi-Fi network that is numerically equal to the average number of elementary time slots during which the countdown counter counts down the delay interval after the previous frame is transmitted before the next data frame will be transmitted.

The process of occurrence of collisions is investigated and calculated ratios for quasi-stationary regime are obtained. It is justified that, due to conflicts, the number of stations competing for access to the radio channel is less than the total number of active stations in the network. The charts of the number of stations competing for the channel, depending on the number of active stations in the network are given and the calculation method is substantiated. Equations were obtained to determine the overall likelihood of network collisions using combinatorial ratios.

The probability of successful transmission for the saturated load network was obtained when the frame retransmission mechanism was used. If up to six repetitions are expected, the probability of successful packet transmission is at least 0.99, provided that the number of active stations does not exceed the number  $CW_{\min}$ .

The throughput of a wireless channel with N active stations with saturated load and taking into account the collisions, but without taking into account interference and attenuation due to interference, according to the concept of virtual competitive window

should be defined as the ratio of the total amount of payload transmitted during the interval of the virtual contention window to the duration of this interval. The mathematical relation for determining the duration of the virtual competitive window interval is substantiated.

The performance of wireless networks of IEEE 802.11a / n specifications is theoretically investigated and the critical capabilities of such networks was determined depending on the number of active stations and the amount of payload in the data frames for both competitive access modes.

When using TCP to transmit data frames with payloads of 64 to 1500 bytes, network bandwidth changes from 1.52 Mbps to 14.78 Mbps, and when using UDP from 2.59 Mbps up to 17.8 Mbps. When using the UDP transport protocol, the estimated throughput of a channel with only one saturated load station will be 70% greater than if TCP is used for small frames (64 bytes payload) and 20% for large ones (1500 bytes payload).

It is justified that the average delay of transmission of the data frame is equal to the duration of the interval of the virtual competitive window. To determine the unevenness of the delay (jitter), the general formula has been modified to take into account the values of probabilistic operational characteristics. In IEEE 802.11a RTS / CTS mode in case of transmission of frames with large amount of useful information (1500 bytes), the average delay varies from 1.5 ms (2 stations in the network) to 11 ms (14 stations in the network), and the delay unevenness varies from 2ms to 105ms respectively. In IEEE 802.11n, the mixed-mode latency in the case of RTS / CTS frames does not exceed 60ms.

The dissertation presents the results of the study of the effectiveness of using IEEE 802.11a / n networks for transmission of audiovisual information. The IEEE 802.11a network provides reliable voice traffic simultaneously for a large number of users (at least 14 active subscribers per access point) both when using a system speed of 54 Mbps and when using a system speed of 24 Mbps. The same applies to 802.11 n network operating in traditional or mixed mode with a single spatial channel in the 20 MHz bandwidth at 72 Mbps system speed.

When used system speed equal to 54 Mbps in IEEE 802.11a wireless network, the network can provide up to three standard definition video streams, MPEG 2 or MPEG 4 compressed. The network can provide up to six low definition video streams encoded according to H.264 standard.

In order to check the adequacy of the advanced mathematical model of the information transfer process and the method of estimating the marginal operational characteristics, a full-scale experiment was performed. Comparison of the values obtained during the tests with the bandwidth values with the predicted values indicates their good correspondence. For example, the estimated bandwidth of a channel in the case of two stations in saturated mode is 55,158 Mbps, and experimentally determined 54,442 - 54,856 Mbps. The divergence of values is in the range of 1.3%. In the case of a large number of stations, the discrepancy between the estimated and obtained throughput values of the bandwidth does not exceed 10%, which indicates the adequacy of the proposed mathematical model.

The following scientific results were obtained in the course of dissertation research.

The mathematical model of the process of transmission of information streams in the IEEE 802.11 wireless network with competitive access in the saturated load mode based on the concept of virtual competitive window is improved, which allows to calculate the operational characteristics of the network in the presence of different number of active stations and different amounts of payload in frames.

A method for estimating the limit values of the operational parameters of IEEE 802.11 wireless networks is proposed, which is based on the application of an advanced mathematical model of the information flow transfer process in the IEEE 802.11 wireless network with competitive access, for which there are no restrictions on the magnitude of probability.

A method for evaluating the efficiency of IEEE 802.11 wireless networks using in competitive mode by using the payload coefficient when transmitting audiovisual information is proposed.

The practical significance of the results obtained is as follows.

The method of forecasting the operational parameters of 802.11 wireless network depending on the number of subscribers and the structure of information traffic, allows the design of wireless networks taking into account the predicted number of subscribers, traffic structure and expected quality of service indicators.

By using of proposed methodology of IEEE 802.11 Wireless networks performance prediction it is possible to upgrade existing wireless networks without unreasonable hardware redundancy.

The theoretical justifications for proposed equations and the equations themselves can be used in the training process to train qualified specialists in the field of telecommunications and computer networks.

Obtained in the thesis refined estimates of information capabilities of wireless networks IEEE 802.11 standard give the ability improve the algorithm of operation of the wireless channel to take into account network parameters and electromagnetic environment.

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

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Lazebnyi V. S., Yin Ch. Estimation of probabilistic processes in wireless networks of 802.11 standard. *Мікросистеми, електроніка та акустика*. 2017. № 5. С. 47–53.
2. Лазебний В. С., Інч Ч. Оцінювання ефективності передавання аудіовізуальної інформації засобами безпроводової мережі 802.11n. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського Серія: «Технічні науки»*. 2018. Т. 29. № 4. Ч. 1. С. 73–82.
3. Лазебний В. С., Інч Ч., Омелянець О. О. Дослідження реальної пропускної спроможності безпроводової інформаційної мережі специфікації 802.11n. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського Серія: «Технічні науки»*. 2018. Т.29 (68) Ч. 1 № 5. С.155-160.
4. Лазебний В. С., Інч Ч. Оцінювання якісних показників бездротової мережі стандарту 802.11 з конкурентним доступом до каналу. *Всеукраїнський науковий збірник Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»*. 2018. № 1(31). С.78-88.
5. Лазебний В.С., Інч Ч. Визначення характеристик безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11 на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. Том 30 (69). Ч. 1, № 2. С. 61-68.
6. Інч Ч. Особенности публичных сетей беспроводного доступа на основе технологии Wi-Fi. *Електроніка-2015: Збірник статей 8 міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 15-17 квітня 2015)*. Київ. 2015. С.266-270.
7. Інч ЧеньЛянь. Оценивание вероятности коллизий в беспроводной сети WI-FI. *Електроніка – 2017: збірник статей 10 міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 25-27 квітня 2017 р.)*. Київ. 2017. С.286-289.
8. Інч Ч. Особенности функционирования беспроводной сети 802.11ac. *Сучасні проблеми застосування електронних та інформаційних технологій в телекомунікаціях, телебаченні та цифровому кінематографі: тези доповідей*

наук.-техн. конф. (Київ, 25 травня 2017 р.). Київ. 2017. с. 20-21.

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

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

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

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

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

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	18
Вступ.....	20
1 Особливості мереж стандарту IEEE 802.11 та методики оцінювання експлуатаційних характеристик.....	27
1.1 Організація доступу до каналу в мережах стандарту IEEE 802.11.....	27
1.2 Особливості мереж стандарту IEEE 802.11 різних специфікацій .....	36
1.2.1 Характеристики сигнальних потоків в мережах IEEE 802.11.....	36
1.2.2 Аналіз результатів досліджень реальної пропускної здатності безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11.....	42
1.3. Обґрунтування необхідності удосконалення методики розрахунку експлуатаційних характеристик безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11.....	54
1.3.1 Особливості та обмеження базової моделі безпроводової мережі та методики оцінювання експлуатаційних характеристик мереж IEEE 802.11.....	55
1.3.2 Особливості модифікованої методики дослідження пропускної здатності безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11ac .....	70
1.3.3 Особливості розрахункової методики на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна .....	75
Висновки до розділу 1 .....	79
2 Удосконалена математична модель процесу передавання інформаційних потоків безпроводовою мережею IEEE 802.11.....	81
2.1 Застосування концепції віртуального конкурентного вікна для визначення стохастичних характеристик безпроводової мережі Wi-Fi....	81
2.1.1 Оцінювання впливу колізій на процес доступу до безпроводового каналу.....	81
2.1.2 Визначення ймовірності успішного передавання кадру в безпроводовій мережі з конкурентним доступом .....	87
2.1.3 Визначення ймовірності колізії у безпроводовій мережі IEEE 802.11 за наявності в ній N активних станцій .....	88

	16
2.2 Визначення кількості колізій та вільних часових слотів в насиченій мережі .....	90
2.3 Оцінювання параметрів якості обслуговування безпроводової мережі...	93
2.3.1 Середня затримка.....	94
2.3.2 Нерівномірність затримки (джитер).....	95
2.3.3 Пропускна здатність безпроводового каналу.....	96
2.3.4 Ймовірність втрати пакету.....	98
Висновки до розділу 2.....	99
3 Теоретичне дослідження експлуатаційних характеристик безпроводових мереж специфікацій IEEE 802.11 a/n.....	100
3.1 Метод оцінювання граничних значень експлуатаційних характеристик...	100
3.2 Дослідження експлуатаційних характеристик безпроводових мереж специфікацій IEEE 802.11a.....	102
3.2.1 Оцінювання пропускну здатності безпроводового каналу IEEE 802.11a в режимі безпосереднього конкурентного доступу....	102
3.2.2 Оцінювання пропускну здатності безпроводового каналу IEEE 802.11a в режимі конкурентного доступу з попереднім повідомленням (RTS/CTS).....	109
3.2.3 Оцінювання параметрів якості обслуговування безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11a.....	112
3.3 Дослідження експлуатаційних характеристик безпроводових мереж специфікацій IEEE 802.11n.....	119
3.3.1. Оцінювання реальної швидкості передавання інформації у безпроводовій мережі стандарту IEEE 802.11n.....	119
3.3.2 Оцінювання параметрів якості обслуговування безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11n.....	125
Висновки до розділу 3.....	127
4 Оцінювання ефективності передавання аудіовізуальної інформації засобами безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11.....	129
4.1 Характеристики аудіовізуальних інформаційних потоків.....	129
4.2 Оцінювання ефективності застосування безпроводових мереж IEEE 802.11 для передавання аудіовізуального контенту.....	133



	17
4.2.1. Характеристики голосового трафіка.....	133
4.2.2 Характеристики потокової відеоінформації.....	137
4.3 Експериментальні дослідження пропускнуої здатності безпроводової мережі IEEE 802.11n.....	138
4.4 Метод оцінювання ефективності використання ресурсів мережі коефіцієнтом корисного навантаження.....	144
4.5 Вплив суміжних мереж на функціонування безпроводового каналу IEEE 802.11.....	145
Висновки до розділу 4.....	149
Висновки.....	151
Список джерел посилання.....	154
Додаток А. Довідка про впровадження результатів дослідження.....	162
Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	164

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ACK	– Acknowledgement, підтвердження;
AIFS	– Arbitration Inter-Frame Spacing, арбітражний між кадровий інтервал
A-MPDU	– Aggregated MPDU, об'єднаний протокольний блок даних
AP	– Access Point, точка доступу;
Beam-forming	– технологія передавання даних з формуванням кількох спрямованих променів
BPSK	– Binary phase-shift keying, двофазна маніпуляція;
BSS	– Basic Service Set, налаштування базової послуги;
CRC-32	– Cyclic redundancy check, 32-бітний циклічний надлишковий код
CSMA/CA	– Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance, множинний доступ з прослуховуванням колізій та запобіганням колізій;
DCF	– Distributed Coordination Function, розподілена функція координації;
DIFS	– DCF Interframe Space, між кадровий інтервал (режиму DCF)
ECFB	– explicit compressed feedback, явний стислий зворотний зв'язок;
EIFS	– Extended Interframe Space, розширений між кадровий інтервал
FCS	– Frame Check Sequence, послідовність для перевірки кадру
FIFO	– first-in-first-out, першим надійшов – перший на обслуговуванні;
HT	– High Throughput, режим з високою пропускнуою здатністю
IBSS	– Independent Basic Service Set, незалежне налаштування базової послуги;
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers, інститут інженерів з електротехніки та електроніки
IP	– Internet Protocol, протокол між мережної взаємодії
LAN	– Local Area Network, локальна інформаційна мережа
LLC	– Logical Link Control, керування процесом передавання
LTE-U	– LTE-Unlicensed (LTE – Long Term Evolution), технологія мобільного зв'язку четвертого покоління, в якій більшу частину даних

передбачено передавати в не ліцензованому діапазоні частот

MAC	– Media Access Control, керування доступом до середовища
MCS	– Modulation and Coding Scheme, схема модуляції та кодування
MIMO	– Multiple Input Multiple Output, система передавання даних, в якій застосовано багато входів та багато виходів
MPDU	– MAC Protocol Data Unit, протокольний блок даних
MSDU	– MAC Service Data Unit, службовий блок даних
MU-MIMO	– Multi-User MIMO, система передавання даних одночасно кільком користувачам, в якій застосовано багато входів та багато виходів
OFDM	– Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, Ущільнення (мультиплексування) з ортогональним частотним поділом
OSI	– Open Systems Interconnection, взаємодія відкритих систем
PCF	– Point Coordination Function, централізована функція координації;
QAM	– Quadrature Amplitude Modulation, квадратурна амплітудна модуляція
QPSK	– Quadro phase-shift keying, чотирифазна маніпуляція;
RTS/ CTS	– Request-to-Send/Clear-to-Send, запит на передавання/готовність до передавання
SIFS	– Short Iterframe Space, короткий між кадровий інтервал;
TCP	– Transmission Control Protocol, протокол керування передаванням
UDP	– User Datagram Protocol, протокол передавання блоків даних (дейтаграм) користувача
Wi-Fi	– Wireless Fidelity, технологія безпроводової локальної мережі з пристроями, що функціонують за стандартом IEEE 802.11
$CW$	– Contention Window, конкурентне вікно
$p_c$	– ймовірність колізії;
$p_e$	– ймовірність появи вільного часового слоту;
$P_s$	– ймовірність успішного передавання кадру;
$\sigma$	– часовий слот (елементарний системний часовий інтервал)
$\tau$	– ймовірність доступу до каналу передавання;
$VCW$	– virtual contention window, віртуальне конкурентне вікно

## ВСТУП

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

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

Останнім часом частка аудіовізуальної інформації в мережах передавання даних зростає. У безпроводових мережах стандарту IEEE802.11 це обумовлено активним під'єднанням до мережі сучасних мобільних телефонів для передавання та приймання для перегляду в реальному часі аудіовізуального контенту. Безпроводові мережі стандарту IEEE802.11 є зручним і доступним засобом для отримання і передавання відео (відео конференції, перегляд кінофільмів, телевізійних програм, спортивних подій, відео контенту із соціальних мереж) та звукової (IP-телефонія, доступ до пісенних та концертних фонограм тощо) інформації, яка є потоковою інформацією. Такі інформаційні потоки створюють велике навантаження на мережу передавання даних, що призводить до

погіршення якісних показників мережі, та унеможлиблює забезпечення якісних інформаційних послуг.

У цій роботі висвітлено питання удосконалення методики оцінювання і прогнозування експлуатаційних характеристик безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11, що функціонує в режимі конкурентного доступу до каналу передавання даних, залежно від таких системних параметрів як мінімальне значення конкурентного вікна, обсяг корисного навантаження в кадрі даних, кількість активних станцій асоційованих з мережею.

Питанням прогнозування і моделювання процесів у безпроводових мережах присвятили свої дослідження фахівці провідних інфо-комунікаційних компаній таких як Cisco, Aruba Networks, Realtek, Dell Technologies та інших організацій-членів Wi-Fi Альянсу, а також багато фахівців, що спеціалізуються у сфері безпроводових систем передавання даних.

Для оцінювання процесів у мережах IEEE 802.11 з конкурентним доступом до каналу застосовують два підходи. Перший з них, що ґрунтується на концепції часового слоту, для мережі з насиченим навантаженням запропонував Дж. Б'янкі (Bianchi Giuseppe). Питанням теоретичного аналізу пропускної здатності, моделюванню процесів у безпроводових мережах, оптимізації функціонування високошвидкісних безпроводових комп'ютерних мереж присвятили низку робіт В. М. Вишне夫斯基й та А. И. Ляхов. Група дослідників S. Takuya, K. Nobuyoshi, S. Niгоо вивчала закономірності пропускної здатності в режимі конкурентного доступу з попереднім запитом щодо передавання (режим RTS/CTS). R. K. Mardeni, A. R. Anuar, , M. G. Salamat дослідили пропускну здатність мережі IEEE 802.11ac; чинники, що впливають на ємність каналу мереж IEEE 802.11ac/n досліджував V. Timo. Експлуатаційні характеристики смартфонів в сучасних мережах IEEE 802.11ac/n досліджували S. Saha, P. Deshpande, P. Inamdar; механізм мультиопитування у високощільних мережах – Чан Д; Lixiang Xiong дослідив характеристики сучасних мереж IEEE 802.11 із застосуванням математичного апарату ланцюгів Маркова. Лазебний В.С. запропонував для аналізу процесів у мережі IEEE 802.11 з конкурентним доступом концепцію віртуального

конкурентного вікна.

Подальше збільшення навантаження мереж IEEE 802.11 внаслідок стрімкого збільшення потокової інформації (аудіовізуальний контент, передавання великих файлів даних) призводить до ускладнень щодо забезпечення якості послуг безпроводових мереж. Правильна організація мереж Wi-Fi із урахуванням особливостей їх функціонування у разі великої кількості активних абонентів та обмеженого частотного ресурсу сприяє максимально ефективному їх використанню та наданню якісних інфо-комунікаційних послуг. Тому питання, пов'язані з аналізом функціонування і прогнозуванням параметрів безпроводових мереж Wi-Fi є на сьогоднішній день актуальними.

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

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

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

Основні завдання дослідження відповідно до поставленої мети полягають у нижченаведеному:

- проаналізувати особливості функціонування, умов експлуатації та експлуатаційні характеристики наявних безпроводових мереж IEEE 802.11;
- обґрунтувати необхідність удосконалення математичної моделі та методики розрахунку експлуатаційних характеристик безпроводових мереж

стандарту IEEE 802.11;

– розробити удосконалену математичну модель процесу передавання даних в мережах IEEE 802.11 з конкурентним доступом і метод прогнозування експлуатаційних характеристик та оцінювання якісних показників з її застосуванням;

– дослідити теоретичну межу рівня експлуатаційних характеристик з урахуванням основних чинників впливу;

– розробити метод оцінювання ефективності використання ресурсів мережі та експериментально перевірити правильність методики оцінювання експлуатаційних параметрів безпроводових мереж IEEE 802.11 з конкурентним доступом.

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

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

**Методи дослідження.** Метод узагальнення для з'ясування характеристик мультимедійного трафіка, метод порівняльного аналізу для виявлення особливостей безпроводових технологій доступу до середовища передавання в мережах IEEE 802.11, критичний аналіз для дослідження теоретичних підходів до аналізу процесів у безпроводових інформаційних мережах, теоретичний аналіз процесу передавання інформації в безпроводовій мережі із застосуванням теорії ймовірностей, метод імітаційного моделювання для отримання кількісної оцінки впливу характеристик фізичного каналу на характеристики безпроводової мережі, натурний експеримент для перевірки відповідності розрахункових та реальних характеристик мережі.

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

1. Удосконалено математичну модель процесу передавання інформаційних потоків у безпроводовій мережі IEEE 802.11 з конкурентним доступом у режимі насиченого навантаження на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна, що на відміну від математичної моделі, побудованої на підґрунті концепції

часового слоту, дозволяє розрахувати експлуатаційні характеристики мережі без обмеження кількості активних станцій і обсягів корисного навантаження в кадрах даних.

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

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

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

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

2. Методика прогнозування експлуатаційних параметрів безпроводової мережі IEEE 802.11 дозволяє уникнути необґрунтованої надмірності апаратних засобів під час модернізації вже наявних безпроводових мереж без особливо в місцях великого скупчення людей.

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



мереж.

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

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

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

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи оприлюднено та обговорено на 6 міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях: VIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених «ЕЛЕКТРОНІКА-2015» (Київ, 2015), X, XI, XII Міжнародні науково-технічні конференції молодих учених «ЕЛЕКТРОНІКА-2017», «ЕЛЕКТРОНІКА-2018», «ЕЛЕКТРОНІКА-2019» (Київ, 2017, 2018, 2019), 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) (Lviv-Slavske, 2018),

Міжвузівська науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Сучасний стан та тенденції розвитку телекомунікацій», (Київ, 2015 р), Науково-технічна конференція студентів та аспірантів «Сучасні проблеми застосування електронних та інформаційних технологій в телекомунікаціях, телебаченні та цифровому кінематографі» (Київ, 2017 р.).

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

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

# 1 ОСОБЛИВОСТІ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ IEEE 802.11 ТА МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Метою даного розділу є проаналізувати особливості реалізації механізмів доступу до каналу станціями безпроводової мережі IEEE 802.11 та з'ясувати проблеми, що виникли внаслідок удосконалення технології і поширення таких мереж.

## 1.1 Фізичний та каналний рівень стандарту 802.11

Стандарт IEEE 802.11 призначено забезпечити функціонування безпроводової мережі на двох нижніх рівнях моделі ISO/OSI (Open Systems Interconnection Basic Reference Model, базової еталонної моделі взаємодії відкритих систем) [1], фізичному і каналному рівнях, рис. 1.1. На рис. 1.1 наведено також протоколи мережного та транспортного рівнів, що багато в чому визначають експлуатаційні параметри безпроводової мережі.

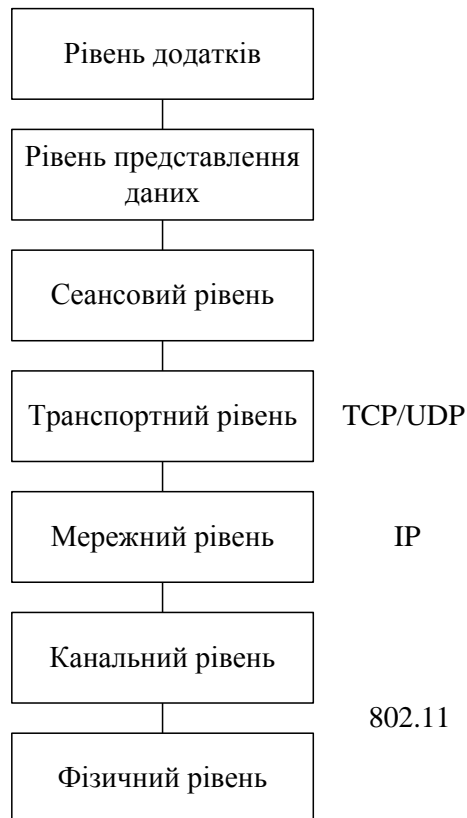


Рисунок 1.1 – Рівні моделі ISO/OSI

Стек протоколів стандарту IEEE 802.11 відповідає загальній структурі

стандартів комітету IEEE 802, тобто складається з фізичного і канального рівнів з підрівнями керування доступом до середовища MAC (Media Access Control) і керування процесом передавання LLC (Logical Link Control). Як і у всіх технологій родини IEEE 802, визначальними для технологій IEEE 802.11 є два нижні рівні, тобто фізичний рівень і рівень керування доступом до каналу (MAC), а на рівень LLC покладено стандартні функції, загальні для всіх технологій локальних інформаційних мереж (LAN), рис. 1.2.

На фізичному рівні існує кілька варіантів специфікацій стандарту IEEE 802.11 (основні наведено на рис. 1.2), які відрізняються робочим частотним діапазоном, методами модуляції та кодування, способом передавання інформаційних потоків між абонентами безпроводової мережі, що обумовлює різну максимальну швидкість передавання даних [2, 3]. Усі варіанти реалізації фізичного рівня функціонують за двома алгоритмами рівня MAC, а деякі часові параметри рівня MAC залежать від використовуваного фізичного рівня.

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

Рисунок 1.2 – Структура та визначальні характеристики фізичного та канального рівнів мереж IEEE 802.11 відповідно до моделі ISO/OSI

Існує два варіанти налаштування безпроводової мережі IEEE 802.11: налаштування базової послуги – BSS, рис. 1.3, та незалежне налаштування базової послуги – IBSS, рис. 1.4 [4, 5].

У стандарті IEEE 802.11 визначено основну структуру мережі (BSS – Basic

Service Set), яка складається з точки доступу та клієнтських пристроїв. Точка доступу (AP – Access Point) є мостом між проводовою мережею і безпроводовим каналом. Зону обслуговування такої мережі називають інфраструктурною зоною обслуговування.

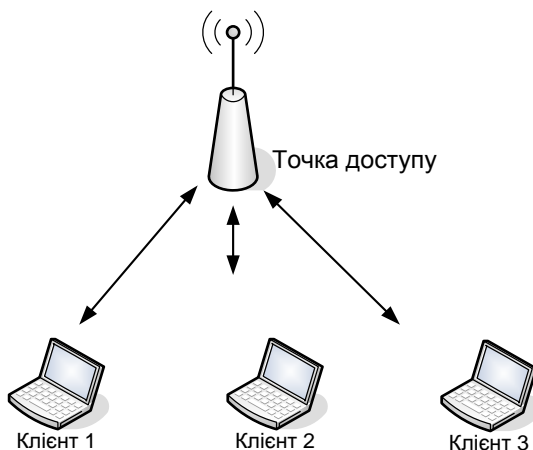


Рисунок 1.3 – Схема безпроводової локальної мережі з інфраструктурою, BSS

Іншим різновидом мережі є мережа без точки доступу, рис.1.4. Така мережа формує незалежну основну зону обслуговування (IBSS – Independent Basic Service Set).

У BSS мережах абонентська станція здійснює зв'язок тільки через точку доступу (AP), тобто безпосереднє передавання між двома абонентськими станціями, що належать до одного сегменту мережі не передбачено. З іншого боку, в IBSS немає ніякої точки доступу (AP), і, отже, весь обмін даними відбувається між абонентськими станціями безпосередньо.

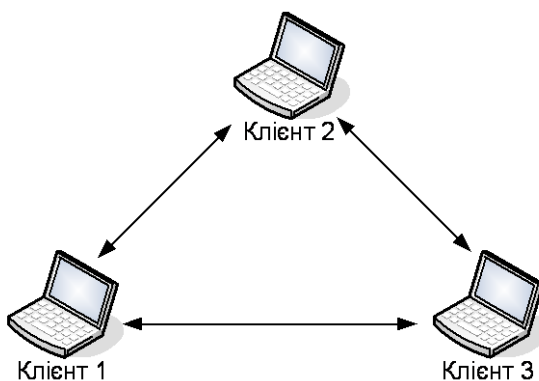


Рисунок 1.4 – Схема непланової (ad-hoc) мережі (IBSS)

У чинних MAC протоколах стандарту IEEE 802.11 [6] використовують

функції керування безпроводовою мережею, які називають функціями координації. Ці функції координують процеси передавання та приймання кадрів даних та кадрів керування. Блок даних, що надходить від більш високого рівня моделі OSI до MAC-рівня, називається службовим блоком даних MAC (MSDU – MAC Service Data Unit), а кадр, який передає MSDU або його фрагмент, разом із заголовком MAC і контрольною сумою кадру (FCS – Frame Check Sequence), яку формують за специфікацією CRC-32, називають протокольним блоком даних MAC (MPDU – MAC Protocol Data Unit). MPDU є кадром, який передають між станціями на MAC-рівні.

Виділяють два різновиди функції координації [7, 8].

Розподілена функція координації (DCF – Distributed Coordination Function) є обов'язковою і основною для всіх специфікацій стандарту IEEE 802.11. Ця функція координації забезпечує рівноправний конкурентний доступ до середовища передавання інформаційних кадрів для всіх вузлів безпроводової мережі (в тому числі і для точки доступу). Тобто функція керування доступом до каналу DCF розподілена між усіма вузлами мережі. У різних реалізаціях стандарту передбачено дещо різні алгоритми реалізації цієї функції. Можливий доступ без застосування спеціальних кадрів керування або із застосуванням таких кадрів. Такий доступ організовано із застосуванням технології CSMA/CA (carrier sensing multiple access with collision avoidance) – множинний доступ з прослуховуванням носійної та запобіганням колізій.

Додаткову функцію координації – функцію централізованої координації доступом (PCF – Point Coordination Function), призначено для організації централізованого неконкурентного доступу до каналу, в якому реалізовано механізм «опитування – відповідь». Точка доступу здійснює опитування всіх клієнтів мережі і надає їм доступ до каналу з урахуванням типу інформації та пріоритету користувача. Деякі виробники мережного обладнання, зокрема компанія Cisco, пропонують спеціальне обладнання для корпоративних мереж, що функціонує із застосуванням функції централізованої координації для забезпечення гарантованого доступу до інформаційного каналу і уникнення

витрат часу на подолання колізій [9, 10].

Режим конкурентного доступу (DCF) є дуже поширеним і більша частина безпроводових мереж функціонує саме з використанням цього режиму [11, 12].

У стандартах групи IEEE 802.11 у процесі реалізації DCF застосовано принцип FIFO (first-in-first-out) – «першим надійшов – перший на обслуговуванні». Механізм CSMA/CA забезпечує реалізацію розподіленого MAC протоколу за умов використання моноканалу. Цей механізм ґрунтується на оцінці стану каналу: канал зайнято, коли якась станція мережі передає кадр, або канал вільний, якщо радіосигнал на частоті каналу відсутній протягом певного інтервалу часу. Основні принципи реалізації CSMA/CA у режимі DCF розглянуто нижче [13].

Розглянемо сценарій, за якого на станцію надходить для передавання певний інформаційний потік (навантаження станції). Потік розподіляють на окремі фрагменти, які разом зі службовою інформацією утворюють кадри даних. Нехай тепер певний кадр знаходиться першим у черзі на передавання. Розподіл часових інтервалів під час спроби доступу до безпроводового каналу в режимі DCF наведено на рис. 1.5.

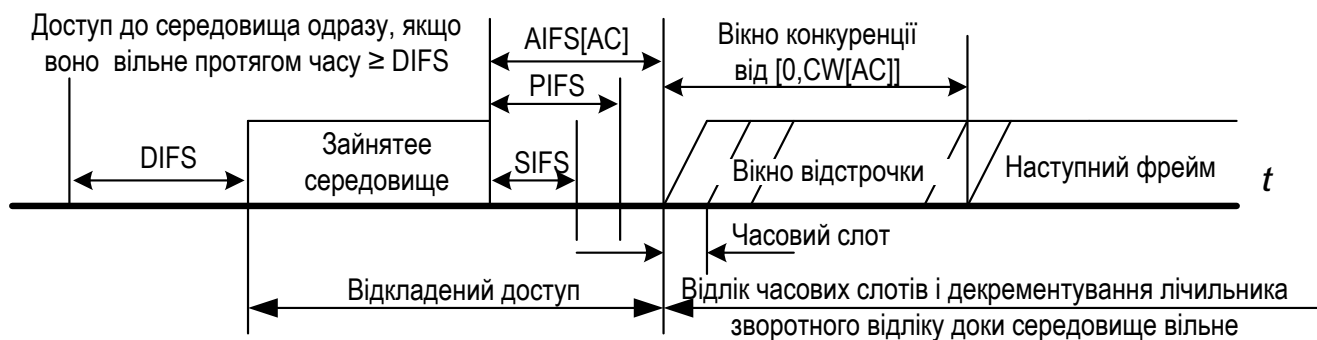


Рисунок 1.5 – Розподіл часових інтервалів у процесі доступу до каналу в режимі DCF за стандартом 802.11

На рис.1.5. застосовано стандартні позначення: DIFS – міжкадровий інтервал режиму DCF; SIFS та AIFS – короткий та арбітражний міжкадрові інтервали, PIFS – міжкадровий інтервал централізованого керування,  $CW=W$  – максимальне початкове значення конкурентного вікна.

Якщо канал зайнято, станція призупиняє будь-які дії, пов'язані з доступом

до каналу, доки середовище стане вільним, і затримує ці дії на додатковий проміжок часу, що називається міжкадровим проміжком DCF (DIFS – DCF Interframe Space), рис. 1.5. Якщо канал залишається вільним протягом інтервалу DIFS, після його завершення станція має сформувати певний інтервал відстрочки квазівипадкової тривалості й тільки після того буде здійснювати передавання поточного кадру (першого в черзі).

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

У подальшому будемо використовувати термін «часовий слот». Протягом кожного часового слоту, під час якого канал залишається вільним, значення лічильника відстрочки зменшується на одиницю, тобто, відбувається його декрементування. Коли значення лічильника досягає нуля, станція здійснює передавання кадру з початком наступного вільного слоту.

У разі, коли до завершення декременту лічильника відстрочки даної станції до нуля інша станція почне передавати свій інформаційний кадр, дана станція призупиняє свій лічильник і відновлює його роботу тільки після завершення чергового інтервалу DIFS. Таким чином, кадр буде передано тільки тоді, коли відстрочка випадкової тривалості повністю завершилась. У разі, якщо кадр надходить для передавання, а черги нема і канал вільний довше часового проміжку DIFS, кадр буде передано згідно з описаною процедурою [13].

Квазівипадковий інтервал формують шляхам вибору випадкового числа із певного інтервалу для завантаження в лічильник зворотного відліку (ЛЗВ). Інтервал цілих чисел  $[0, \dots, (CW-1)]$ , із якого вибирають число для завантаження в ЛЗВ називають конкурентним вікном (CW – Contention Window).

Мінімальне значення  $CW_{\min}$  – це системний параметр, значення якого визначене відповідною специфікацією стандарту IEEE 802.11 та виробником мережного обладнання.

Після кожного успішного приймання кадру, приймальна станція одразу надсилає кадр підтвердження (ACK). Кадр ACK передають після короткого



міжкадрового інтервалу SIFS (Short Interframe Space), коротшого ніж DIFS. Інші станції зможуть продовжити процес підрахунку інтервалу відстрочки тільки після завершення інтервалу DIFS, рис.1.5.

Завдяки меншій тривалості інтервалу SIFS часовий проміжок для передавання кадру АСК захищений від конкуренції з боку інших станцій. Якщо після передавання даних кадр АСК не надійшов протягом прогнозованого інтервалу, станцією, що здійснювала передавання попереднього кадру, буде здійснено повторну процедуру доступу до каналу для здійснення повторного передавання втраченого кадру.

Під час першої спроби отримати доступ до каналу значення параметра  $CW$ , що визначає тривалість інтервалу відстрочки, вибирають з мінімального числового інтервалу обмеженого значенням  $(CW_{\min}+1)$ .

У разі невдалої спроби передати кадр даних, тобто, коли кадр підтвердження не надійшов, у лічильник відстрочки буде занесене нове значення з нового інтервалу цілих чисел  $[0, \dots, CW-1]$ , для якого верхнє значення визначають за формулою

$$CW := 2(CW_{\min} + 1) - 1. \quad (1.1)$$

Тобто, такий інтервал містить  $CW$  однаково ймовірних значень, а ймовірність вибору одного з них буде  $1/CW$ .

Такий механізм оновлення лічильника відстрочки зменшує ймовірність колізії у разі, якщо кілька станцій намагаються отримати доступ до каналу передавання. Після кожного вдалого передавання значення параметра  $CW$  набуває початкового значення  $(CW_{\min}+1)$ , а станція, що вдало виконала передавання, після завершення інтервалу DIFS також формує чергову випадкову відстрочку, навіть у разі, якщо у черзі на передавання немає жодного кадру. Цей процес називають «пост-відстрочка» через те, що її здійснюють після передавання. Така пост-відстрочка забезпечує, принаймні, один часовий інтервал відстрочки між двома послідовними передаваннями MPDU. Найбільше значення вікна відстрочки обмежено верхньою межею  $CW_{\max}$ .

За певних умов у безпроводовій локальній мережі може утворитись прихована станція. Для того, щоб зменшити проблему прихованої станції та зменшити втрати часу через колізії, у стандарті IEEE 802.11 передбачено механізм «Запит щодо відправлення/Готовність до відправлення» (Request-to-Send/Clear-to-Send – RTS/ CTS). Діаграми розподілу часових інтервалів у разі застосування такого режиму доступу до каналу наведено на рис.1.6.

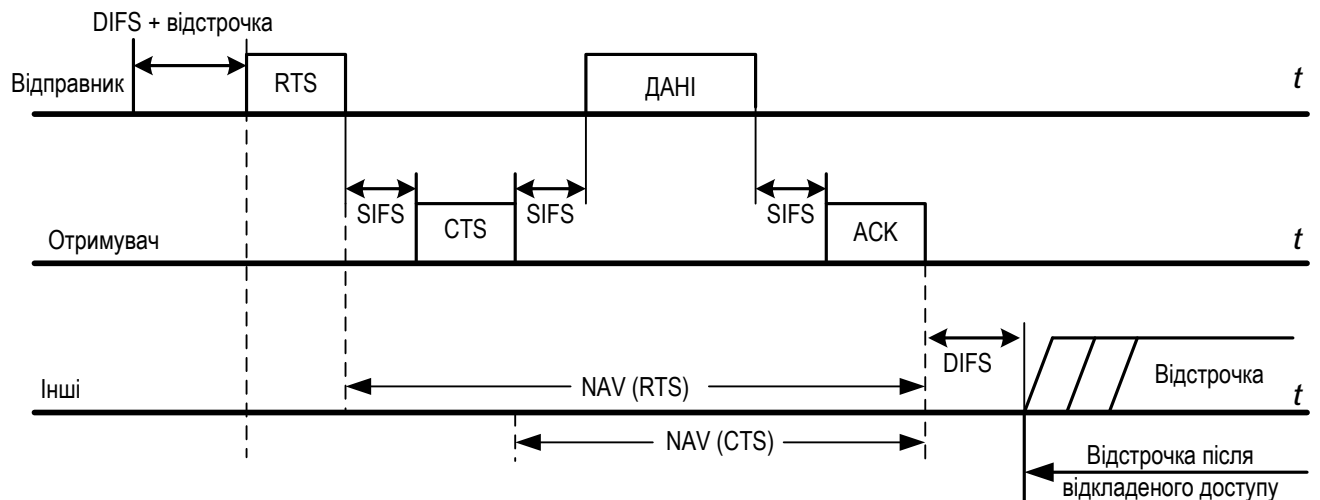


Рисунок 1.6 – Розподіл часових інтервалів у разі застосування режиму доступу до каналу RTS/CTS

Якщо в мережі використано механізм RTS/CTS, тоді, перед тим як передати кадр даних, станція надсилає короткий кадр RTS, у відповідь на який надходить кадр CTS, переданий приймальною станцією. RTS та CTS кадри містять інформацію про те, скільки часу знадобиться для передавання наступного кадру даних і отримання відповідного кадру підтвердження ACK або іншими словами – тривалість прогнозного інтервалу передавання кадру і супутньої службової інформації. Цей інтервал називають вектором розподілу мережі (Network Allocation Vector – NAV). Таким чином, інші станції, що сприймають сигнал передавальної станції, та приховані станції, що знаходяться близько від приймальної станції, не почнуть своє передавання через те, що у них буде встановлено таймер вектора розподілу мережі, і вони не будуть здійснювати зворотний відлік, доки інтервал NAV не буде вичерпано. Тільки після цього станції знову можуть брати участь у конкуренції за доступ до каналу.

Між послідовними кадрами RTS, CTS, кадром даних і кадром ACK, використовують інтервал SIFS, як це наведено на рис.1.6. Слід зауважити, що використання послідовності кадрів RTS/CTS може бути дуже корисним, навіть за умови відсутності прихованих станцій. Наприклад, коли багато станцій мережі конкурують за доступ до каналу, втрата пропускної спроможності через колізії, що виникають під час передавання кадрів RTS, може бути набагато меншою порівняно з втратами через колізії під час передавання значно більших кадрів даних [14].

Усі параметри каналного рівня, такі як SIFS, DIFS, часовий слот  $\sigma$  (ST),  $CW_{\min}$  та  $CW_{\max}$ , визначені в кожній специфікації стандарту IEEE 802.11 як параметри фізичного рівня, табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Значення параметрів фізичного рівня специфікацій стандарту 802.11 для режимів з максимальною обов'язковою швидкістю передавання [15]

Специфікація \ Параметр	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n	802.11ac	802.11ax
S, Мбіт/с	11	24	36	348	4620	6208
Тип модуляції	ССК	16-QAM	16-QAM	64-QAM	64-QAM	256-QAM
R, Мбіт/с	–	1/2	3/4	2/3	5/6	5/6
Система модуляції та кодування	DSSS, ССК	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM	OFDMA
SIFS, мкс	10	16	10	10	10	10
DIFS, мкс	50	34	28	28	28	28
$\sigma$ , мкс	20	9	9	15	4,5	4,5
$CW_{\min}$	31	15	15	15	15	31
$CW_{\max}$ , мкс	1023	1023	1023	1023	1023	1023

У табл. 1.1 використано такі позначення: S – максимальна швидкість передавання кодованих даних (системна швидкість), що є обов'язковою для специфікації; R – швидкість завадостійкого коду; DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum – метод модуляції з розширенням спектру інформаційного сигналу заміною кожного інформаційного біта псевдовипадковою послідовністю обмеженої довжини, ССК – Complementary Code Keying – метод кодування

інформаційного потоку заміною кожного інформаційного біта восьмибітною узгодженою послідовністю, OFDM – Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – метод формування сигнального потоку шляхом ущільнення (мультиплексування) модульованих ортогонально розділених носійних частот; OFDMA – метод множинного доступу з ортогональним частотним розділенням (OFDMA). Множинний доступ забезпечують шляхом використання окремих підгруп носійних частот OFDM для передавання окремих потоків даних [16, 17].

Ще два параметри, один з яких визначає тривалість пріоритетного міжкадрового інтервалу PIFS (Priority Interframe Space), а інший – міжкадровий інтервал відсутності передавання у режимі координованого доступу PCF IFS, незалежно від специфікації визначають із застосуванням співвідношень

## **1.2 Особливості функціонування мереж стандарту IEEE 802.11 різних специфікацій**

### **1.2.1 Характеристики сигнальних потоків в мережах IEEE 802.11**

У початкових технологіях стандарту IEEE 802.11 (специфікації IEEE 802.11 та IEEE 802.11b) запропоновано використовувати кодове розділення каналів, що забезпечувало максимальну швидкість сигнального потоку 2 Мбіт/с та 11 Мбіт/с. У подальшому відбувся перехід до застосування технології OFDM, що забезпечило значне збільшення швидкості передавання інформаційних потоків. Хоча сучасне мережне обладнання забезпечує сумісність з усіма попередніми специфікаціями стандарту, проаналізуємо особливості специфікацій, що ґрунтуються на технології модуляції та кодування OFDM. Саме ці специфікації визначають особливості функціонування сучасних безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11.

Можна відзначити таку спадковість специфікацій: першою специфікацією, в якій було застосовано метод OFDM для діапазону 5 ГГц була специфікація 802.11a, наступною – специфікація IEEE 802.11g, в якій відтворено специфікацію 802.11a для діапазону 2,4 ГГц майже без змін, наступною – специфікація IEEE

802.11n (діапазони 2,4 ГГц та 5 ГГц), в якій передбачено можливість збільшення ширини частотного каналу до 40 МГц та передавання кількома просторовими потоками, що призвело до значного зростання швидкості передавання сигнальних потоків порівняно зі специфікацією IEEE 802.11a, наступною – специфікація IEEE 802.11ac (діапазони 5 ГГц), в якій зроблено додаткові удосконалення технології доступу до каналу і його використання для передавання інформаційних потоків. Останньою в цьому ряду є специфікація IEEE 802.11ax (розширений діапазон частот від 1 ГГц до 7 ГГц), в якій поліпшення характеристик передбачено за рахунок значної зміни параметрів OFDM потоків та застосування повнодуплексного режиму передавання на відміну від напівдуплексного попередніх специфікацій [2, 3, 15].

Специфікацію IEEE 802.11a розроблено для частотного діапазону поблизу 5 ГГц, метод модуляції сигналу – ортогональне частотне мультиплексування (OFDM), що дозволяє досягти максимальної швидкості передавання сигнального потоку 54 Мбіт/с [13]. Залежно від електромагнітної обстановки передбачено й інші швидкості:

- обов'язкові – 6, 12 та 24 Мбіт/с;
- не обов'язкові – 9, 18, 36, 48, та 54 Мбіт/с.

Для досягнення високих сигнальних швидкостей у стандарті застосовано технологію квадратурної амплітудної модуляції насійних частот QAM-16.

Угрупування насійних частот складається з 52 носійних: 48 – для передавання даних, 4 – для передавання пілот-сигналів. Безпроводові станції мають одну антену. Передавання здійснюють в напівдуплексному режимі. Тривалість одного символу OFDM 4 мкс, тривалість захисного інтервалу 0,8 мкс.

Специфікація IEEE 802.11g взяла найкраще зі специфікацій IEEE 802.11a та IEEE 802.11b. Фактично IEEE 802.11g створено на підґрунті 802.11a для роботи у частотному діапазоні 2,4 ГГц із забезпеченням сумісності з обладнанням стандарту IEEE 802.11b. Максимальна швидкість передавання 54 Мбіт/с в разі застосування технології OFDM з квадратурною амплітудною модуляцією (QAM). Передбачені швидкості передавання [2]:

- обов'язкові – 1; 2; 5,5; 6; 11; 12 та 24 Мбіт/с;
- не обов'язкові – 33, 36, 48, та 54 Мбіт/с.

Для досягнення таких показників крім OFDM, використовують кодування за допомогою послідовності додаткових кодів (ССК), метод гібридного кодування (ССК-OFDM) та метод пакетного згорткового кодування (РВСС). Кількість носійних в угрупованні та способи доступу до каналу такі самі, як передбачено в специфікації IEEE 802.11a.

Мережа IEEE 802.11n може функціонувати в діапазоні 2,4 ГГц і використовувати радіоканал з шириною частотної смуги 20 МГц (так само, як це передбачено специфікаціями IEEE 802.11g/b) або 40 МГц (два об'єднаних суміжних канали по 20 МГц) чи в діапазоні 5 ГГц (як це передбачено специфікацією 802.11a), з використанням частотних каналів 20 та 40 МГц [18].

Специфікацією передбачено застосовувати для передавання інформації систему модуляції та кодування OFDM. Основні параметри системи OFDM, передбачені в специфікації IEEE 802.11n: тривалість корисної частини символу OFDM 3,2 мкс, тривалість захисного інтервалу 0,8 або 0,4 мкс; кількість носійних частот для каналу з частотною смугою 20 МГц становить 52, кількість частот для передавання пілот-сигналів 4; кількість носійних частот для каналу з частотною смугою 40 МГц становить 112, кількість частот для передавання пілот-сигналів 6. Максимальна величина агрегованих кадрів: A-MPDU – 4095 (зазвичай обмежують 2346) байтів, A-MSDU – 4065 (зазвичай обмежують 2304) байтів. Для модуляції і кодування носійних OFDM символу передбачено велику кількість схем (всього 77 схем з урахуванням можливих режимів MIMO – Multiple Input Multiple Output). Кожну схему позначають відповідним індексом MCS (Modulation and Coding Scheme). Значення швидкості передавання даних в межах кадру фізичного рівня наведено в табл.1.2.

У специфікації IEEE 802.11n регламентовано три режими роботи мережі:

1. High Throughput (HT) або Greenfield Mode – режим з великою пропускною здатністю, в якому можуть функціонувати тільки мережні станції (клієнти), що підтримують стандарт IEEE 802.11n.

2. Non-HT (Legacy) Mode – успадкований режим, всі кадри, відправлені станціями мережі в якому, сформовані відповідно до специфікації стандартів IEEE 802.11a/g (допустима ширина частотної смуги каналу тільки 20 МГц).

3. HT Mixed Mode – змішаний режим, за якого є можливість використати переваги режиму з високою пропускною здатністю спільно з механізмом, який реалізує можливість роботи з обладнанням, відповідним стандартам IEEE 802.11a/g. Преамбула старого формату надає можливість клієнтам, що функціонують за протоколами IEEE 802.11a/g передавати і приймати дані від точки доступу IEEE 802.11n.

Таблиця 1.2 – Розрахункові значення швидкості передавання даних в одному просторовому каналі мережі IEEE 802.11n

Індекс MCS	Кількість просторових потоків	Тип модуляції та швидкість коду	Швидкість передавання даних (GI=0,8 мкс), Мбіт/с, $\Delta f = 20$ МГц	Швидкість передавання даних (GI=0,4 мкс), Мбіт/с, $\Delta f = 20$ МГц	Швидкість передавання даних (GI=0,8 мкс), Мбіт/с, $\Delta f = 40$ МГц	Швидкість передавання даних (GI=0,4 мкс), Мбіт/с, $\Delta f = 40$ МГц
0	1	BPSK 1/2	6,5	7,2	13,5	15
1	1	QPSK 1/2	13	14,4	27	30
2	1	QPSK 3/4	19,5	21,7	40,5	45
3	1	16-QAM 1/2	26	28,9	54	60
4	1	16-QAM 3/4	39	43,3	81	90
5	1	64-QAM 2/3	52	57,8	108	120
6	1	64-QAM 3/4	58,5	65	121,5	135
7	1	64-QAM 5/6	65	72,2	135	150

Основною технологією доступу до радіоканалу є технологія конкурентного доступу із застосуванням кадрів RTS та CTS (Request To Send/Clear To Send), рис.1.4. Передавання кадрів RTS відбувається в режимі конкурентного доступу за алгоритмом DCF. Режим передавання буде залежати від кількості антен передавальної та приймальної станції. Тобто, режим із застосуванням кількох

просторових каналів передавання (MIMO) може бути реалізований у форматі: 2x2, 3x3, 4x4, 2x3, 3x2, 2x1, 1x2. Останні два формати: 2x1 – дві передавальні антени і одна приймальна (SIMO – single input, multiple output) та 1x2 – одна передавальна антена і дві приймальних (MISO – multiple input, single output) забезпечують таку ж максимальну пропускну здатність, що й система 1x1 (SISO – single input, single output), але із більшою надійністю. Тобто, можуть забезпечити максимальну пропускну здатність, за умови наявності більшого рівня радіозавад в каналі, порівняно з системою SISO.

У режимі НТ кількість носійних частот OFDM угруповання в разі функціонування мережі з використанням частотної смуги 20 МГц збільшено до 56, з яких 52 – для передавання даних і 4 – для передавання пілот-сигналів. Максимальну швидкість загорткового коду збільшено до 5/6 і передбачено опційну можливість зменшувати тривалість захисного інтервалу до 0,4 мкс. Зазначені удосконалення призвели до збільшення максимальної сигнальної швидкості передавання до 72,2 Мбіт/с. В разі використання частотної смуги 40 МГц кількість носійних частот OFDM угруповання дорівнює 114, з яких 108 призначено для передавання даних. Максимальна сигнальна швидкість передавання становить 150 Мбіт/с в разі використання одного просторового потоку. За умови застосування чотирьох сигнальних потоків максимальна розрахункова сигнальна швидкість становить 600 Мбіт/с.

Специфікацію стандарту Wi-Fi IEEE 802.11ac впроваджено у 2015 році. Теоретична швидкість передавання даних такої мережі досягає 866 Мбіт/с в каналі 160 МГц. Дану специфікацію характеризують такі особливості [19, 20]:

- безпроводовий канал зв'язку функціонує в діапазоні частот 5 ГГц;
- для передавання інформаційних потоків можливо використовувати частотні канали завширшки 20, 40, 80, 160 МГц;
- передбачено можливість використовувати більшу кратність квадратурної модуляції для носійних OFDM сигналу;
- використано ефективніші види модуляції сигналу;
- застосовано технологію одночасного доступу до кількох абонентів мережі



MIMO (Multi-User MIMO);

– запроваджено технологію формування діаграми спрямованості на приймальну станцію (технологія формування променя – Beamforming).

У стандарті IEEE 802.11ac передбачено можливість передавати більшу кількість просторових потоків даних (до восьми) порівняно зі специфікацією IEEE 802.11n [21- 22].

Застосування в стандарті 802.11ac квадратурної модуляції носійних більш високого порядку, 256-QAM, забезпечує збільшення пропускної здатності безпроводової мережі приблизно в 4 рази порівняно з модуляцією 64-QAM (в стандарті 802.11n). Максимальна пропускна здатність каналу 160 МГц, утвореного одним променем з одним просторовим каналом становить 867 Мбіт/с [21]. В разі використання восьми просторових каналів і кількох променів (2-4 промені) максимальна розрахункова пропускна здатність безпроводового каналу становить 6933 Мбіт/с.

Пристрої з підтримкою MU-MIMO можуть одночасно передавати інформаційні потоки чотирьом клієнтам із застосуванням чотирьох діаграм спрямованості. В одній діаграмі можна передавати до 4 просторових потоків, але загальна кількість просторових потоків не більше 8. Максимальна кількість просторових потоків не більше кількості антен передавальної або приймальної станції.

Застосування технології Beamforming дозволяє ефективніше використовувати смугу пропускання, що позитивно впливає на процес передавання поточкових музичних та відеофайлів, ігор та додатків, що дуже чутливі до пропускної здатності і затримок в мережі.

Дальність розповсюдження сигналу (радіус зони покриття) в частотному діапазоні 5 ГГц менше, ніж у випадку використання частотного діапазону 2,4 ГГц.

Специфікація IEEE 802.11ax спрямована на підвищення швидкості передавання даних у насиченому режимі точки доступу. У стандарті використовують декілька механізмів для можливості доступу до каналу передавання більшої кількості користувачів та для надійності обміну інформацією

безпроводовою мережею.

Мережа 802.11ax забезпечує функціонування в діапазонах частот 2,4 та 5 ГГц, підтримує базові частотні смуги 20/40/80/160 МГц [3], роботу за технологією MIMO  $8 \times 8$ , що забезпечує одночасне передавання до 8 просторових потоків в двох напрямках (низхідному та висхідному каналах, DL та UL). Також в специфікації можлива підтримка модуляції 512- і 1024-QAM та змінений алгоритм передавання преамбули та повторного відправлення втрачених кадрів.

З використанням даних механізмів мережі 802.11ax теоретично можуть здійснювати обмін інформацією зі швидкістю 10 Гбіт/с [23].

У стандарті 802.11ax застосовують метод просторового кодування сигналу MU-MIMO і для передавання у висхідному каналі (Up-link Multi-user Multiple Input Multiple Output, ULMU MIMO), від користувачів до точки доступу. У технології IEEE 802.11ax застосовують множинний доступ з ортогональним частотним розподілом (OFDMA), що дозволяє ефективно використовувати частотний діапазон, усунути частотно-селективні завмирання та інтерференцією [24].

На фізичному рівні стандарт IEEE 802.11ax функціонує подібно специфікації 802.11ac. У технології передбачено мультиплексування з ортогональним частотним розподілом каналів (OFDM) та підтримується робота в частотних діапазонах частотою: 20, 40, 80,  $80 + 80$  і 160 МГц.

Стандартом підтримується збільшення кількості носійних угруповання OFDM до 2048. У випадку такого типу модуляції скорочено інтервал рознесення ортогональних носійних (рис. 1.7, б). порівняно з інтервалом попередніх версій IEEE 802.11 (рис. 1.7, а).

У специфікації 802.11ax використано технологію множинного доступу з ортогональним частотним розподілом (OFDMA).

В технології OFDMA збільшено тривалість OFDM-символів в чотири рази (12,8 мкс замість 3,2 мкс), що дозволяє збільшити кількість підносійних та забезпечити високу вибірковість мережі [24]. Очікують, що надійність багатокористувацького передавання у висхідному каналі буде високою, оскільки в

разі збільшення тривалості символу ймовірність виникнення помилок під час приймання зменшується.

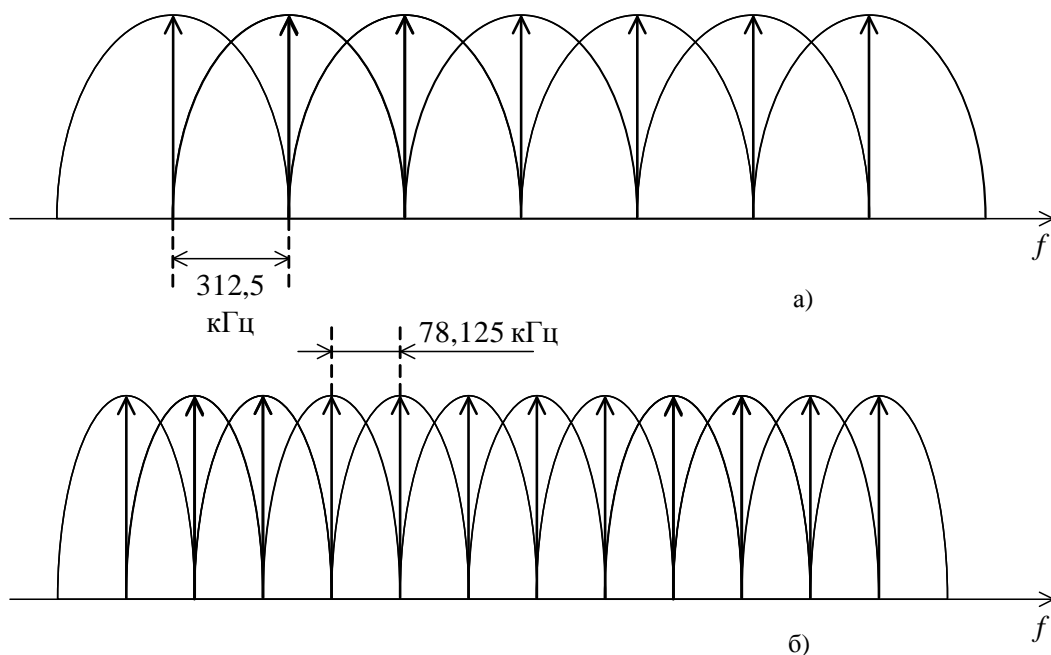


Рисунок 1.7 – Структура спектру OFDM-сигналів специфікацій 802.11a/g/n/ac (а) та 802.11ax (б)

Також у стандарті IEEE 802.11ax передбачено збільшення захисного інтервалу (Guard Interval, GI) між OFDM-символами, що дозволяє зменшити інтерференцію між ними. Передбачено три варіанти тривалості захисного інтервалу: стандартний 0,8 мкс, а також збільшені 1,6 мкс та 3,2 мкс [25].

У специфікації модифіковано формат кадрів. Преамбула кадру складається зі стандартної частини і преамбули специфікації 802.11ax. Стандартна частина преамбули може бути декодована станціями Wi-Fi попередніх специфікацій, що використовується для сумісності роботи мереж різних стандартів IEEE 802.11.

У стандарті IEEE 802.11ax можливе використання квадратурної модуляції 1024-QAM, але використання такого високого порядку модуляції вимагає високого відношення сигнал/шум для зменшення ймовірності виникнення помилок. Модуляція 1024-QAM збільшує пропускну здатність каналу передавання на 20 відсотків, але може застосовуватись лише у приміщеннях, де між передавачем і приймачем невелика відстань.

Передавання службових кадрів використовує значну частку каналного

ресурсу та зменшує пропускну здатність. Для зменшення часу на передавання службового трафіку в стандарті 802.11ax заборонено передавати кадри, що містять ідентифікатор мережі WLAN: SSID, часові мітки (time stamp) та іншу інформацію про точку доступу в діапазоні 2,4 ГГц на швидкості передавання даних менших 5,5 Мбіт/с [24, 26].

У табл. 1.3 наведено значення максимальної розрахункової пропускну здатності безпроводового каналу в разі використання різних специфікацій стандарту IEEE 802.11 та супутні параметри. Максимальна пропускну здатність є опційним параметром.

Таблиця 1.3 – Граничні значення параметрів безпроводових мереж різних специфікацій стандарту IEEE 802.11

Версія стандарту	802.11	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n	802.11ac	802.11ax
Рік ратифікації	1997	1999	1999	2003	2009	2014	2017-2019
Робоча частота, ГГц	2,4/IR	2,4	5	2,4	2,4/5	5	2,4/5
Ширина смуги каналу зв'язку, МГц	20	20	20	20	20/40	20/40/80/160	20/40/80/160
Пікова фізична швидкість (PHY), Мбіт/с	2	11	54	54	600	6933	9608
Макс. кількість SU-потоків (SU-Streams)	1	1	1	1	4	8	8
Макс. кількість MU-потоків (MU-Streams)	–	–	–	–	–	4	8
Технологія передавання даних	DSSS, FHSS	DSSS, CC K	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM, OFDMA
Тип модуляції, швидкість кодування	DQPSKD	CCK	64-QAM, 3/4	64-QAM, 3/4	64-QAM, 5/6	256-QAM, 5/6	1024-QAM, 5/6
Макс. кількість носійних OFDM	–	–	64	64	128	512	2048
Рознесення носійних, кГц	–	–	312,5	312,5	312,5	312,5	78,125

### 1.2.2 Аналіз відомих результатів досліджень реальної пропускну здатності безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11

Для оцінювання можливостей безпроводових мереж IEEE 802.11 щодо

передавання аудіовізуальної інформації за умов одночасного користування мережею кількома абонентами треба проаналізувати результати, отримані різними дослідниками.

**1.2.2.1 Аналіз результатів експериментальних досліджень безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11.** У процесі практичного застосування безпроводових мереж IEEE 802.11 різних специфікацій було з'ясовано, що реальна пропускна здатність радіоканалу мережі на багато менше ніж максимальна розрахункова сигнальна швидкість задекларована у відповідній специфікації [27-29].

У роботі [27] автором наведено результати вимірювання пропускної здатності радіоканалу безпроводових мереж, що функціонують за специфікаціями IEEE 802.11n та IEEE 802.11ac у разі застосування протоколів транспортного рівня UDP та TCP. В даному експерименті кожен мережу налаштовано на максимально можливу ширину частотного каналу, яку дозволяло обладнання – це 20 МГц для IEEE 802.11n у діапазоні 2.4 ГГц, ширина каналу 40 МГц для IEEE 802.11n у діапазоні 5 ГГц, і ширина каналу 80 МГц для 802.11ac (функціонує тільки у діапазоні 5 ГГц).

Схему досліджуваної мережі наведено на рис.1.10.

Схема складається з двох комп'ютерів ПК1, ПК2 (конфігурація: Intel Core i5 Quad Core 760 з частотою процесора 2.8 ГГц, 8 Гб оперативної пам'яті DDR3, жорсткий диск на 500 Гб (Western Digital), ОС Windows 7 SP1 64 біт).

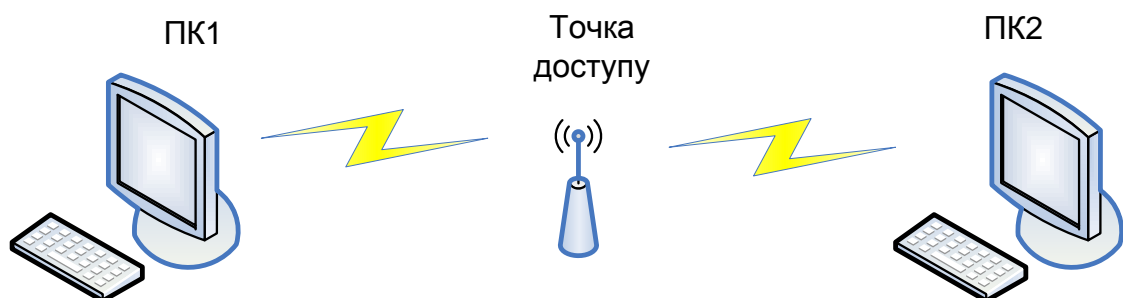


Рисунок 1.10 – Схема безпроводової мережі 802.11 n/ac для визначення основних експлуатаційних параметрів [27]

На ПК встановлено безпроводовий дводіапазонний адаптер ASUS PCE-

AC66 802.11ac, точка доступу, використана в експерименті – Linksys EA6500, що є також дводіапазонним мережним пристроєм. Для генерації дослідного інформаційного потоку використано програмний пакет Distributed Internet Traffic Generator (D-ITG) – безкоштовне програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, сумісний з Windows 7. Також працює під Linux-похідними ОС (Ubuntu, Debian тощо) і FreeBSD. D-ITG добре зарекомендував себе в тестуванні трафіка безпроводових локальних мереж [27].

Під час експериментів вимірювання характеристик мережі здійснено для однорідних потоків, сформованих із пакетів різної довжини, від 128 до 524288 байтів (точні значення: 128, 512, 2048, 8192, 32768, 131072, 524288 байтів). У першому експерименті вимірювали пропускну здатність TCP та UDP трафіка. У другому – вимірювали джитер (jitter) TCP та UDP трафіка. У третьому – затримку передавання пакетів. Результати вимірювань наведено на рис.1.11-1.12.

На графіках застосовано такі позначення AC v4 – графік, відповідний режиму 802.11ac (діапазон 5ГГц) й використанню пакетів згідно з протоколом IPv4; позначення N2,4 v6 – графік, відповідний режиму 802.11N у діапазоні 2,4 ГГц з використанням пакетів згідно з протоколом IPv6.

Наведені на графіках значення пропускну здатності каналу значно відрізняються від тих, що наведено у специфікаціях стандарту 802.11, табл. 1.1.

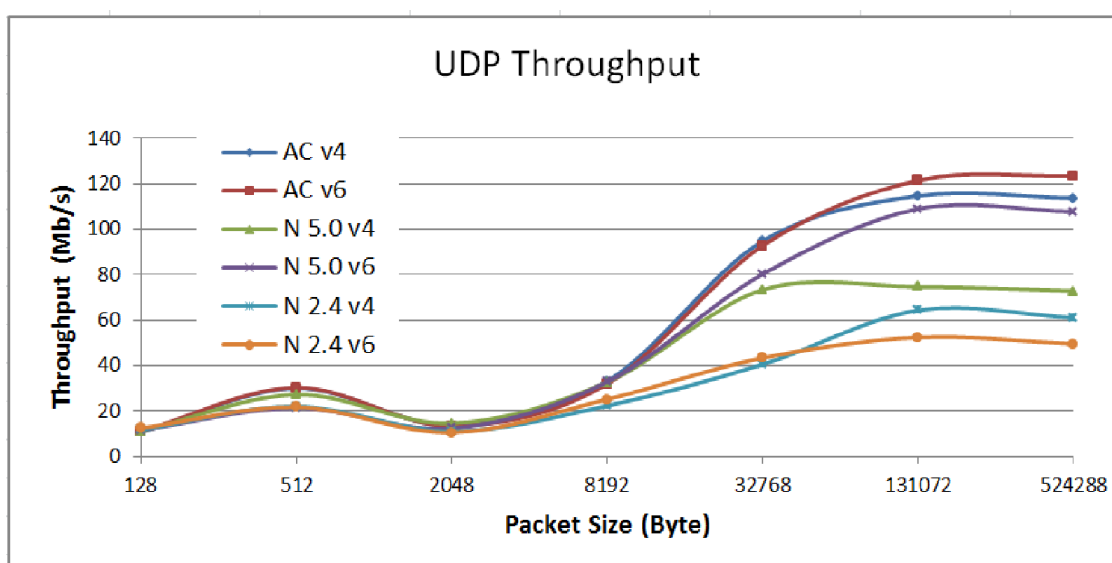


Рисунок 1.11 – Пропускна здатність безпроводового каналу в разі передавання інформаційного потоку за протоколом UDP [27]

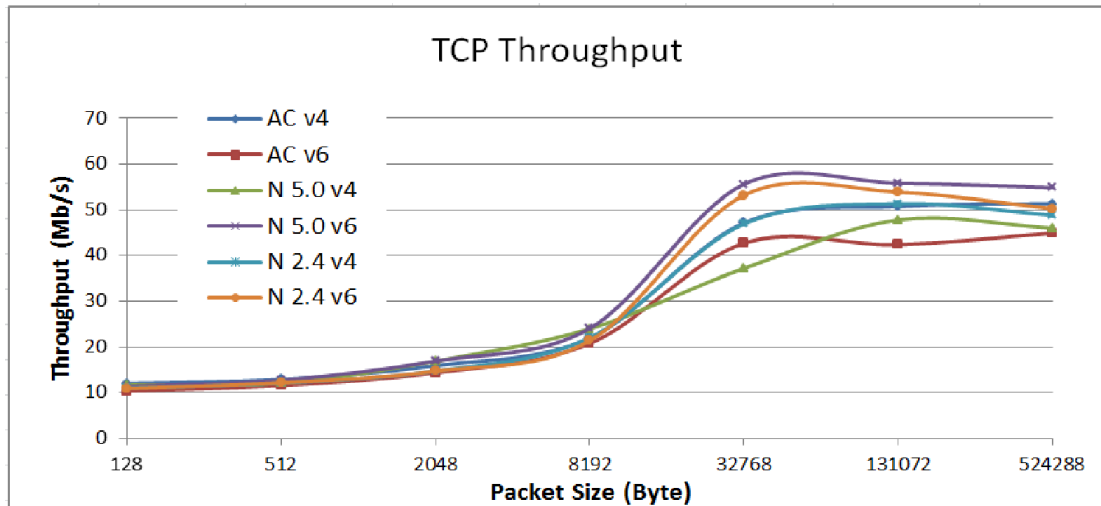


Рисунок 1.12 – Пропускна здатність безпроводового каналу в разі передавання інформаційного потоку за протоколом TCP [27]

Отримані значення пропускної здатності каналу [27] доволі малі і автори досліджень не навели кількох важливих чинників, що характеризують умови проведення експериментів. Не вказано чи врахували автори той факт, що у наведеній схемі експерименту одночасно канал використовують дві станції: комп'ютер, з якого здійснюють передавання інформаційного потоку та точка доступу. Це дві станції, що конкурують за канал. І, якщо реальну швидкість вимірювали за швидкістю надходження інформації на другий комп'ютер (приймач), для визначення пропускної швидкості каналу треба наведену на графіках пропускну здатність збільшити у два рази. Але і в цьому разі пропускну здатність каналу особливо для кадрів з корисним навантаженням 128 – 2048 байтів значно менше задекларованої у специфікаціях.

У роботі не наведено результатів моніторингу електромагнітної обстановки під час проведення експериментів. Оскільки точка доступу, використана в експерименті, забезпечує адаптацію ширини частотної смуги з урахуванням рівня завад у каналі, то ймовірно усі експерименти було проведено з радіоканалом з шириною частотної смуги 20 МГц. Але навіть з урахуванням усіх зроблених зауважень отримані в експериментах значення пропускної здатності радіоканалу дуже відрізняються від задекларованих у стандарті IEEE 802.11.

Розглянемо результати досліджень реальної пропускної здатності

радіоканалу мереж IEEE 802.11n/ac наведених у роботі [28]. У роботі наведено результати досліджень для мереж IEEE 802.11n/ac залежно від відстані між абонентами мережі.

Дослідження зроблено за ідеальних умов: відкритий майданчик, сигнал між антенами розповсюджується у просторі, обмеженому першою зоною Френеля, відсутні завади інших радіосистем у використаному радіоканалі. Експериментальні інформаційні потоки були сформовані для двох типів транспортних протоколів UDP та TCP. Розмір корисного навантаження одного кадру становив 1470 байтів.

У дослідженні використано антенний комплекс зовнішньої точки доступу MMJ344LV та модуль WPJ344, що забезпечує формування двох просторових потоків за специфікацією 802.11n та 802.11ac, та відповідне програмне забезпечення. Коефіцієнт підсилення антенного комплексу MMJ344LV становить 5 – 11 dBi (у роботі не наведено). Для передавання в експериментах використано два просторових потоки з шириною радіочастотного каналу 40 МГц для мережі 802.11n і 80 МГц для мережі 802.11ac. Результати досліджень наведено нижче.

Порівняльні графіки пропускної здатності безпроводової мережі у разі застосування протоколів транспортного рівня TCP та UDP, рис. 1.13-1.14.

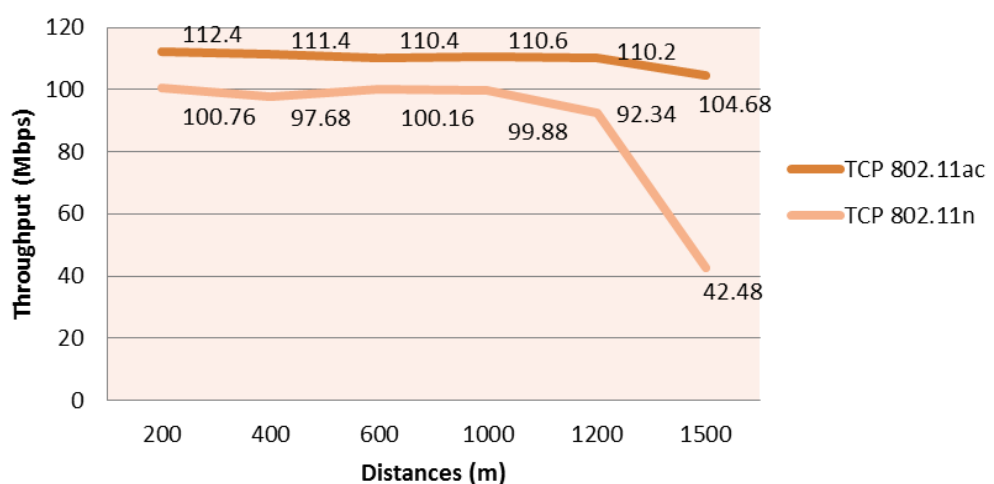


Рисунок 1.13 – Графіки залежності пропускної здатності каналу мережі 802.11 залежно від відстані між вузлами мережі для TCP трафіка [28]

Як впливає з наведених графіків пропускна здатність радіоканалу мережі



IEEE 802.11n та IEEE 802.11ac у разі використання двох просторових каналів з розширеними частотними смугами становить приблизно 100-110 Мбіт/с.

З урахуванням того, що подвоєння кількості просторових каналів призводить до подвоєння пропускної здатності, і розширення частотної смуги в два рази теж призводить до подвоєння пропускної здатності, пропускна здатність каналу завширшки 20 МГц в разі використання транспортних протоколів UDP та TCP і інформаційних пакетів з корисним навантаженням 1470 байтів становить приблизно 25 – 28 Мбіт/с. Такі результати добре корелюють з результатами, отриманими в роботі [27].

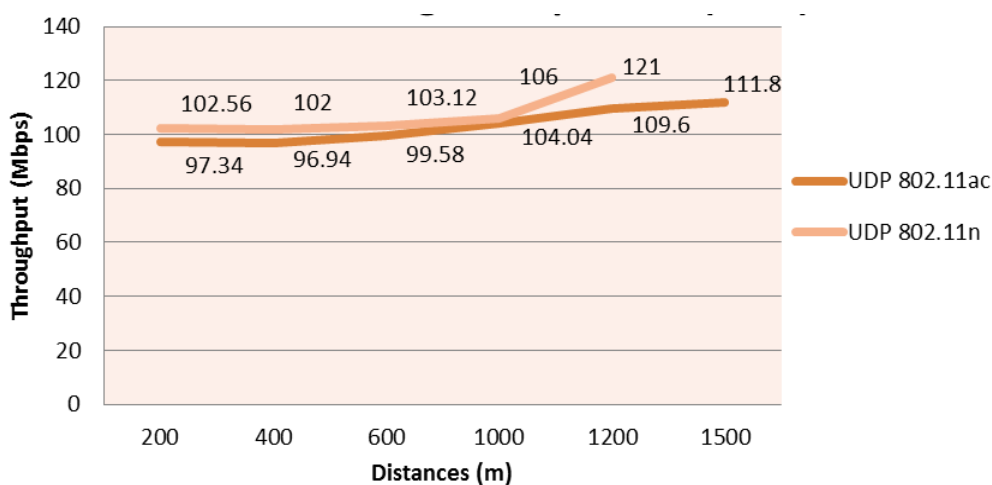


Рисунок 1.14 – Графіки залежності пропускної здатності каналу мережі 802.11 залежно від відстані між вузлами мережі для UDP трафіка [28]

Результати іще одного дослідження наведено у роботі [29]. Для оцінювання пропускної здатності безпроводового каналу використовували чотири типи різних смартфонів. Смартфон Nexus S працює тільки в діапазоні 2,4 ГГц. Інші три телефони працюють в обох діапазонах (у випадку мережі 802.11n), але вони забезпечують підтримку режиму об'єднання частотних смуг (ОЧС) тільки в діапазоні 5 ГГц. Для дослідження сформовано інформаційні потоки з UDP пакетів обсягом по 1470 байтів. Дослідження зроблено для двох частотних смуг 20 та 40 МГц та для різних схем модуляції та кодування (MCS). Результати досліджень пропускної здатності безпроводового каналу 802.11n наведено на рис. 1.15 – 1.16 [29]. Результати досліджень пропускної здатності безпроводового каналу 802.11ac наведено на рис. 1.17 [29].

Як впливає із наведених графіків пропускна здатність каналів мереж 802.11n та 802.11ac значно менше пропускної здатності задекларованої у відповідних специфікаціях стандарту [18, 19].

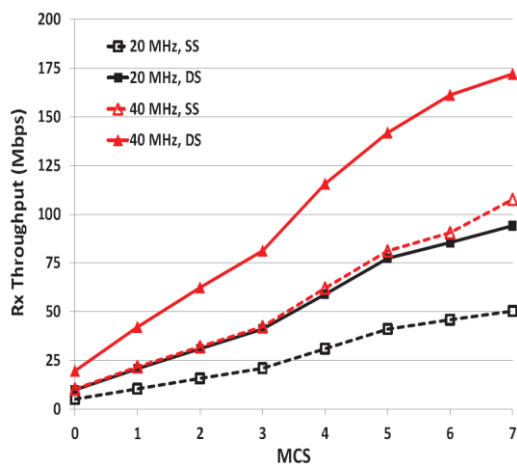


Рисунок 1.15 – Пропускна здатність каналу 802.11n для низхідного потоку

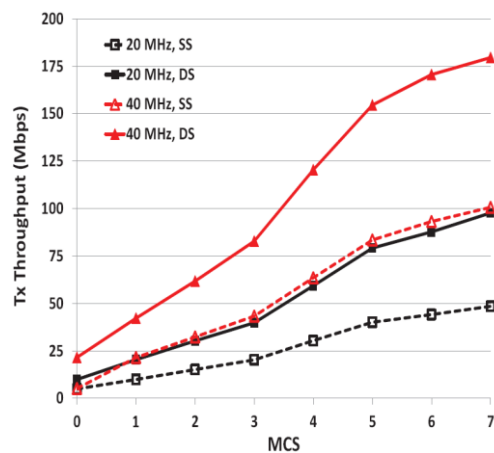


Рисунок 1.16 – Пропускна здатність каналу 802.11n для висхідного потоку

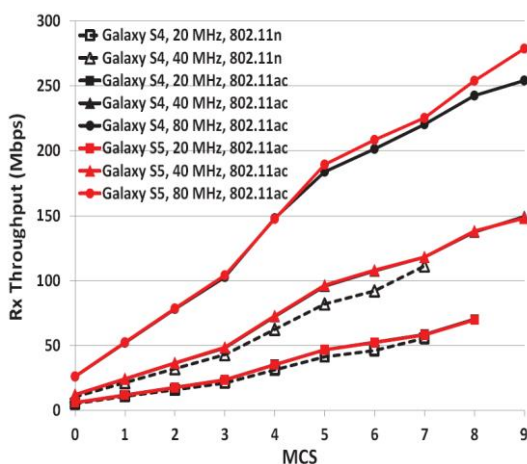


Рисунок 1.16 – Пропускна здатність каналу 802.11ac для низхідного потоку

**1.2.2.2 Аналіз проблем широкого розповсюдження безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11.** З виходом нових стандартів Wi-Fi, а також у зв'язку із загальним поширенням гаджетів, які функціонують в неліцензованому діапазоні частот, користувачі все частіше звертають увагу на те, що якість Wi-Fi мереж погіршується навіть за умови появи нових удосконалених специфікацій цього стандарту. Згідно зі статистикою, в усьому світі сьогодні використовують 6,4 мільярда безпроводових пристроїв. До 2020 року очікують, що кількість безпроводових пристроїв становитиме в середньому 2,8 на одну людину. Але

причина деградації експлуатаційних параметрів Wi-Fi мереж обумовлена не тільки в збільшенні кількості пристроїв [30, 31].

На цю ситуацію впливає ще кілька чинників.

По-перше, в кожному багатоповерховому житловому будинку або офісній споруді вже встановлено велику кількість безпроводових маршрутизаторів. Приклад наведено на рис. 1.17. На скріншоті наведено результати вимірювання завантаження частотного діапазону 2,4 ГГц, на п'ятому поверсі студентського гуртожитку протягом 5 хв. У період 20 год 37 хв – 20 год 42 хв. Графічні залежності характеризують рівень потужності створюваний різними мережними засобами у точці вимірювання. Наведено лише частину джерел випромінювання та їх характеристики. Із наведених на рис.1.17 даних випливає, що всі мережі створюють одна одній доволі потужні завади оскільки частотні смуги каналів перекриваються (задіяні канали 11,10, 6, 5, 4 решту не відображено).

По-друге, попит на швидкісне передавання даних неухильно зростає, а це означає, що потрібно збільшувати частотні смуги радіоканалів, і як наслідок це веде до того, що каналів буде менше, але з досить широкими смугами. І третій, важливий чинник – стільникові оператори "скидають" трафік з мобільних мереж у Wi-Fi мережі (Wi-Fi Offloading).

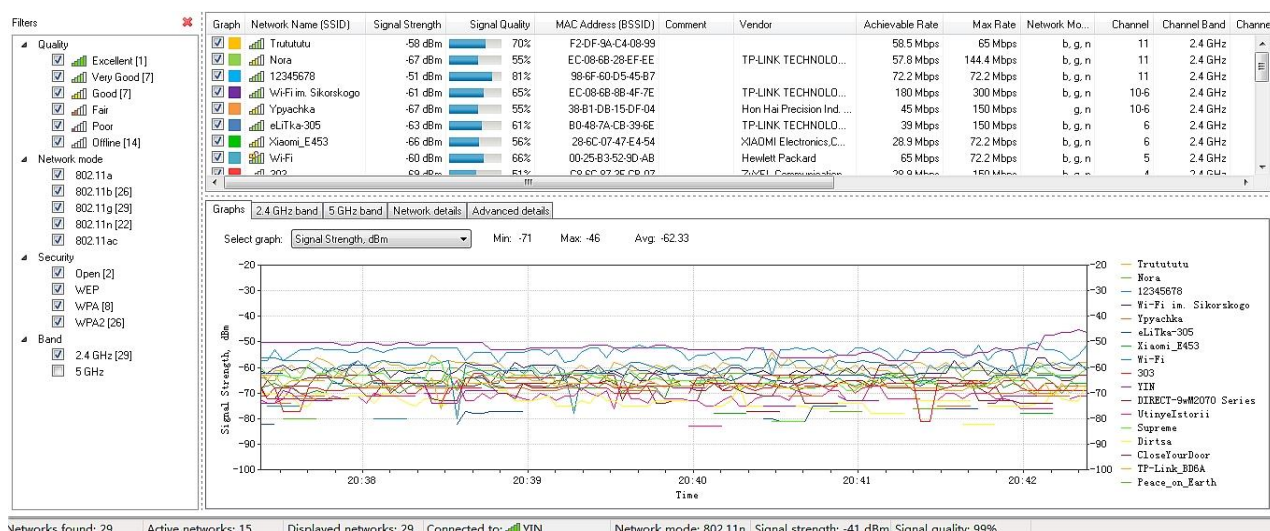


Рисунок 1.17 – Результати вимірювання рівнів сигналів у частотному діапазоні 2,4 ГГц, на п'ятому поверсі гуртожитку №6 КПІ ім. Ігоря Сікорського

### 1.2.2.3 Аналіз особливостей функціонування безпроводових мереж у

**неліцензованих діапазонах.** У разі використання технології Wi-Fi користувачі повинні дотримуватись певних технічних вимог, обумовлених частотними регуляторами, наприклад, у вигляді обмеження потужності. Домашні Wi-Fi-мережі функціонують в діапазонах 2,4 і 5 ГГц.

З фізичних причин у діапазоні 2,4 ГГц мережі функціонують краще: радіосигнали цього діапазону краще поширюються крізь стіни і на більші відстані порівняно з сигналами діапазону 5 ГГц (за однакового рівня потужності).

У різних країнах дозволено використовувати різну кількість каналів. Наприклад, в Україні, як і в Європі, використовують 13 каналів, а в Японії – 14, що дозволяє їм використовувати чотири канали, що не перекриваються.

У не ліцензованому діапазоні 2,4 ГГц, кожен радіоканал може бути завширшки 22 мегагерци, тому тільки деякі з усіх каналів можна використовувати одночасно так, щоб вони не заважали один одному. Як правило, це 1, 6 і 11 канали, рис.1.18.

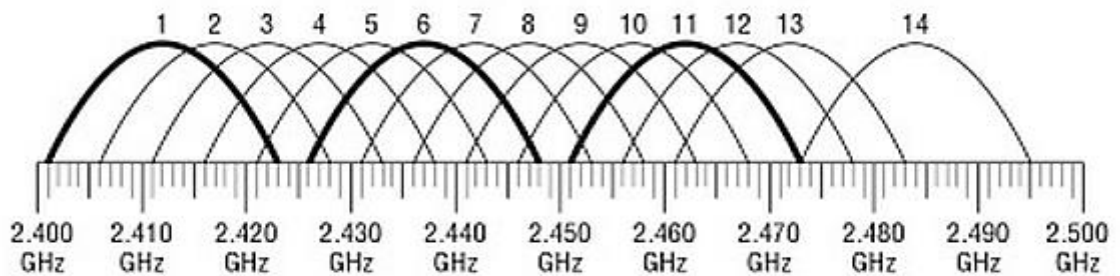


Рисунок 1.18 – Схема розподілу каналів 22 МГц у діапазоні 2,4 ГГц [32]

Зсув частоти радіосмуги кожного наступного каналу становить 5 МГц. Тому, якщо на одній території функціонує більше трьох маршрутизаторів у діапазоні 2,4 ГГц, то вони однозначно створюють один одному завади.

Сигнали у смузі 5 ГГц мають меншу дальність поширення всередині приміщень, але ця смуга (діапазон від 5,80 до 5,825 ГГц) має 24 канали, що не перекриваються, завширшки 20 МГц в США. На п'ять менше в Європі та Японії. Це досить велика кількість додаткових каналів для безпроводового зв'язку, яка могла б вирішити проблему їх зайнятості обладнанням. Але приблизно половину цих каналів виділено для первинного використання метеорологічними і

військовими радарми. Тому більшість користувацьких маршрутизаторів не використовують ці смуги [30].

У багатьох регіонах (особливо в мегаполісах) надмірне навантаження доступних каналів досягло такого рівня, що смугу 2,4 ГГц майже не можливо використовувати для передавання даних з високою швидкістю. Зарубіжний досвід такий, що деякі провайдери широкосмугових послуг (наприклад, AT & T, British Telecom, Comcast тощо) більше не використовують 2,4 ГГц для передавання відео або голосу. Майже всі виробники смартфонів, разом з Apple, більше не рекомендують використовувати свої смартфони на частоті 2,4 ГГц. Останній і найшвидший варіант Wi-Fi, IEEE 802.11ac, забезпечує роботу тільки в діапазоні 5 ГГц, хоча більшість обладнання Wi-Fi підтримує обидві смуги (але в основному для підтримки старих мобільних пристроїв) [30].

**1.2.2.4 Зміни умов функціонування мереж у діапазоні 5ГГц.** Перенесення Wi-Fi-комунікацій з частот 2,4 ГГц у діапазон 5 ГГц на якийсь час вирішило проблему з надмірним навантаженням каналів, але від цього постраждав радіус дії мереж, тому багато споживачів звернулися до простих рішень для збільшення зони охоплення (наприклад, до різних підсилювачів і ретрансляторів). Популярні стали і mesh-мережі, які стали використовувати для отримання рівномірного Wi-Fi покриття у всіх частинах будівлі.

Ситуація ускладнюється ще й тим, що мобільні оператори зв'язку вичерпали велику частину свого ексклюзивного спектра і планують протягом наступних трьох років переносити передавання мобільних даних на 60% в неліцензійний спектр, який використовують для Wi-Fi мереж. Технологія для цього рішення називається LTE-Unlicensed (LTE-U). Її використовують 4G LTE-базові станції для відправлення та приймання даних через ті ж частотні смуги 5 ГГц діапазону, що і Wi-Fi. Деякі організації, такі як Cable Television Laboratories, Google і Microsoft, відзначають, що LTE-U буде в цілому погіршувати роботу Wi-Fi мереж. У США Verizon і T-Mobile почали пробні розгортання LTE-U, щоб визначити його вплив на Wi-Fi. Оператори в Європі і Азії також планують подібні випробування [30].

Теоретично специфікація IEEE 802.11ac може забезпечити високу пропускну здатність безпроводового каналу, що дозволяє передавати відео високої якості. Ця специфікація Wi-Fi забезпечує гігабітні швидкості з'єднання. Але щоб можна було передавати дані з вказаною швидкістю, в IEEE 802.11ac передбачено об'єднання каналів. У разі реалізації найбільш високопродуктивної конфігурації IEEE 802.11ac Wave 3 передбачено об'єднувати весь доступний спектр Wi-Fi у два канали завширшки по 160 МГц. Це злиття означає, що тільки дві пари пристроїв можуть взаємодіяти із застосуванням найширшого каналу одночасно без взаємних завад. Тому, якщо у певному просторовому сегменті вже є дві точки доступу 802.11ac, то поява третьої призведе до значного зменшення швидкості передавання даних для всіх користувачів. Фахівці вважають, що в результаті ситуації, що склалася, всі ті додаткові переваги, які надавав діапазон 5 ГГц в порівнянні з 2,4 ГГц, зникли [30].

До певного поліпшення ситуації може призвести застосування технології динамічного вибору частоти (Dynamic Frequency Selection – DFS), яка полягає у використанні частотних каналів діапазону 5 ГГц, виділених для метеорологічних та військових радарів там де вони відсутні або в ті інтервали часу, коли радари не функціонують.

### **1.3 Обґрунтування необхідності удосконалення методики розрахунку експлуатаційних характеристик безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11**

Метою даного розділу є з'ясувати основні підходи до аналізу процесів на каналному та фізичному рівнях, дослідити особливості реалізації механізму доступу до каналу станціями безпроводової мережі IEEE 802.11, проаналізувати математичні співвідношення, які використовують для визначення експлуатаційних характеристик, та визначити межі їх застосування. Результати аналітичного дослідження використано для обґрунтування необхідності удосконалити методику розрахунку експлуатаційних характеристик безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11.

### **1.3.1 Особливості та обмеження базової моделі безпроводової мережі та методики оцінювання експлуатаційних характеристик мереж IEEE 802.11**

Базовою технологією доступу до спільного безпроводового інформаційного каналу мережі стандарту IEEE 802.11 є технологія конкурентного доступу. В ранніх версіях цього стандарту режим конкурентного доступу передбачено застосовувати безпосередньо під час процедури передавання кадрів даних, а в подальших версіях його передбачено використовувати під час передавання коротких спеціальних службових кадрів, що ініціюють процес доступу до каналу передавання [33].

Для аналізу функціонування безпроводового каналу та визначення його експлуатаційних характеристик запропоновано певні математичні моделі.

Розробленню моделей каналу присвячено багато робіт, зокрема в роботах [14, 34-42] запропоновано моделі, в яких враховано базові принципи функціонування мереж стандарту IEEE 802.11. Усі ці моделі оперують однорідними потоками даних і не враховують особливостей передавання мультимедійної інформації. Як правило їх адаптовано до певних умов функціонування мережі. Класичним підходом до аналізу процесів у мережах стандарту IEEE 802.11 є підхід, запропонований Дж. Б'янкі і підтриманий іншими дослідниками, що полягає у використанні поняття «насиченої пропускної здатності» та «насиченого навантаження» станції та мережі в цілому [14].

У цій роботі детально проаналізовано реалізацію протоколу доступу до каналу, що передбачено специфікаціями стандарту IEEE 802.11 з конкурентним доступом. У межах цього аналізу розглянуто вплив на роботу мережі службових повідомлень.

Проаналізуємо можливість оцінити граничні значення основних експлуатаційних характеристик для режиму DCF [13, 44] для однієї станції мережі за ідеальних умов із застосуванням моделі і методу, запропонованих Дж. Б'янкі.

Для визначення граничних значень розглянуто сценарій, за якого в мережі активною буде лише одна станція. Для спрощення процедури оцінювання

запропоновано не виокремлювати службові повідомлення протоколів вищих рівнів й враховувати їх як дані, інтегровані з корисним навантаженням [14].

Пропускна здатність каналу за наявності лише однієї станції мережі запропоновано визначати за припущення, що передані кадри не спотворені шумом і завадами на фізичному рівні. За таких умов відсутні втрати і затримки внаслідок колізій або спотворення. Пропускна здатність можна визначити за співвідношенням [14, 34,44]

$$S = \frac{E[PL]}{E[T_{Fr\_Tx}] + DIFS + ST \cdot CW_{min}/2}, \quad (1.2)$$

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

Проміжок часу, протягом якого здійснено успішне передавання кадру  $T_{Fr\_Tx}$ , з урахуванням наведеного вище аналізу процесу передавання кадрів, рис.1.5, можна визначити для режиму DCF за співвідношенням

$$E[T_{Fr\_Tx}] = T_{MPDU} + SIFS + T_{ACK}, \quad (1.3)$$

де  $T_{MPDU}$  – тривалість інтервалу часу, необхідного для безпосереднього передавання кадру даних,  $T_{ACK}$  – тривалість інтервалу часу, необхідного для передавання кадру підтвердження ACK.

Значення наведених часових параметрів залежать від швидкості передавання на фізичному рівні, що визначено відповідною специфікацією стандарту, а також розміру кадру даних. Зауважимо, що для специфікацій 802.11a,b,g,n,ac передбачено цілу низку дискретних значень швидкостей, що може бути використано під час експлуатації мережі. Швидкість передавання залежить від типу модуляції та швидкості згорткового коду. Наприклад, фізичний рівень



802.11b [13] забезпечує усього чотири швидкості передавання, а саме: 1, 2, 5,5 і 11 Мбіт/с, а у специфікації 802.11n передбачено набагато більше можливих швидкостей, табл.1.4 [18].

Деякі алгоритми адаптації швидкості передавання залежно від інших параметрів мережі можна знайти в [35, 36, 45].

Таблиця 1.4 – Розрахункові швидкості передавання каналу 802.11n

MCS-індекс	Кількість просторових потоків	Тип модуляції	Ефективність кодування	Швидкість передавання, Мбіт/с			
				ширина каналу 20 МГц		ширина каналу 40 МГц	
				GI = 800 нс	GI = 400 нс	GI = 800 нс	GI = 400 нс
0	1	BPSK	1/2	6.50	7.20	13.50	15.00
1	1	QPSK	1/2	13.00	14.40	27.00	30.00
2	1	QPSK	3/4	19.50	21.70	40.50	45.00
3	1	16-QAM	1/2	26.00	28.90	54.00	60.00
4	1	16-QAM	3/4	39.00	43.30	81.00	90.00
5	1	64-QAM	2/3	52.00	57.80	108.00	120.00
6	1	64-QAM	3/4	58.50	65.00	121.50	135.00
7	1	64-QAM	5/6	65.00	72.20	135.00	150.00
8	2	BPSK	1/2	13.00	14.40	27.00	30.00
9	2	QPSK	1/2	26.00	28.90	54.00	60.00
10	2	QPSK	3/4	39.00	43.30	81.00	90.00
11	2	16-QAM	1/2	52.00	57.80	108.00	120.00
12	2	16-QAM	3/4	78.00	86.70	162.00	180.00
13	2	64-QAM	2/3	104.00	115.60	216.00	240.00
14	2	64-QAM	3/4	117.00	130.00	243.00	270.00
15	2	64-QAM	5/6	130.00	144.40	270.00	300.00
16	3	BPSK	1/2	19.50	21.70	40.50	45.00
17	3	QPSK	1/2	39.00	43.30	81.00	90.00
18	3	QPSK	3/4	58.50	65.00	121.50	135.00
19	3	16-QAM	1/2	78.00	86.70	162.00	180.00
20	3	16-QAM	3/4	117.00	130.00	243.00	270.00
21	3	64-QAM	2/3	156.00	173.30	324.00	360.00
22	3	64-QAM	3/4	175.50	195.00	364.50	405.00
23	3	64-QAM	5/6	195.00	216.70	405.00	450.00
24	4	BPSK	1/2	26.00	28.80	54.00	60.00
25	4	QPSK	1/2	52.00	57.60	108.00	120.00
26	4	QPSK	3/4	78.00	86.80	162.00	180.00
27	4	16-QAM	1/2	104.00	115.60	216.00	240.00
28	4	16-QAM	3/4	156.00	173.20	324.00	360.00
29	4	64-QAM	2/3	208.00	231.20	432.00	480.00
30	4	64-QAM	3/4	234.00	260.00	486.00	540.00
31	4	64-QAM	5/6	260.00	288.80	540.00	600.00

З урахуванням формату кадру даних MPDU за умови сигнальної швидкості передавання  $R_{MPDU\_Tx}$  і корисного навантаження одного кадру  $PL$  байтів тривалість

$T_{MPDU}$  визначають за співвідношенням

$$T_{MPDU} = T_{PLCP} + 8 \cdot (28 + PL) / R_{MPDU\_Tx}, \quad (1.4)$$

де  $T_{PLCP}$  – це час на повідомлення, що супроводжує процес передавання на фізичному рівні, наприклад, преамбула та заголовок, і дорівнює 192 мкс у випадку довгої преамбули специфікації 802.11b. Число 28 у формулі (1.4) враховує число байтів службових даних заголовка MAC і поле FCS.

Час передавання кадру ACK, що має довжину 14 байтів, за швидкості передавання  $R_{ACK\_Tx}$  може бути визначений згідно зі співвідношенням

$$T_{ACK} = T_{PLCP} + 8 \cdot 14 / R_{ACK\_Tx}. \quad (1.5)$$

У разі функціонування мережі в режимі «запит – відповідь» ( $RTS/CTS$ ) повний час на передавання одного кадру даних становитиме

$$T_{Fr\_Tx} = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{MPDU} + 2SIFS + T_{ACK}. \quad (1.6)$$

З урахуванням обсягів інформації службових пакетів  $RTS$  (20 байтів) і  $CTS$  (14 байт) і відповідної швидкості передавання час передавання цих пакетів складе відповідно

$$T_{RTS} = T_{PLCP} + 8 \cdot 20 / R_{RTS\_Tx}, \quad (1.7)$$

$$T_{CTS} = T_{PLCP} + 8 \cdot 14 / R_{CTS\_Tx}. \quad (1.8)$$

Для оцінювання впливу різних чинників на пропускну здатність мережі в [34] розглянуто відношення пропускну здатності до швидкості передавання блоку даних в межах кадру (MPDU). Нормовану таким чином пропускну здатність мережі наведено на рис. 1.19. Нормовану (відносну) пропускну здатність подано як функцію корисного навантаження переданого в одному кадрі даних.

З наведених графіків зроблено висновок, що нормована пропускну здатність збільшується зі збільшенням корисного навантаження в кадрі даних. Відзначено,

що нормована пропускна здатність набуває більших значень для меншої швидкості передавання, що обумовлено відносно меншими витратами часу на передавання службових повідомлень протоколу фізичного рівня (оскільки ці повідомлення передають завжди з фіксованою низькою швидкістю).

У розглянутій ситуації, коли передавання здійснює одна станція, обмін у режимі RTS/CTS призводить до зменшення пропускної здатності.

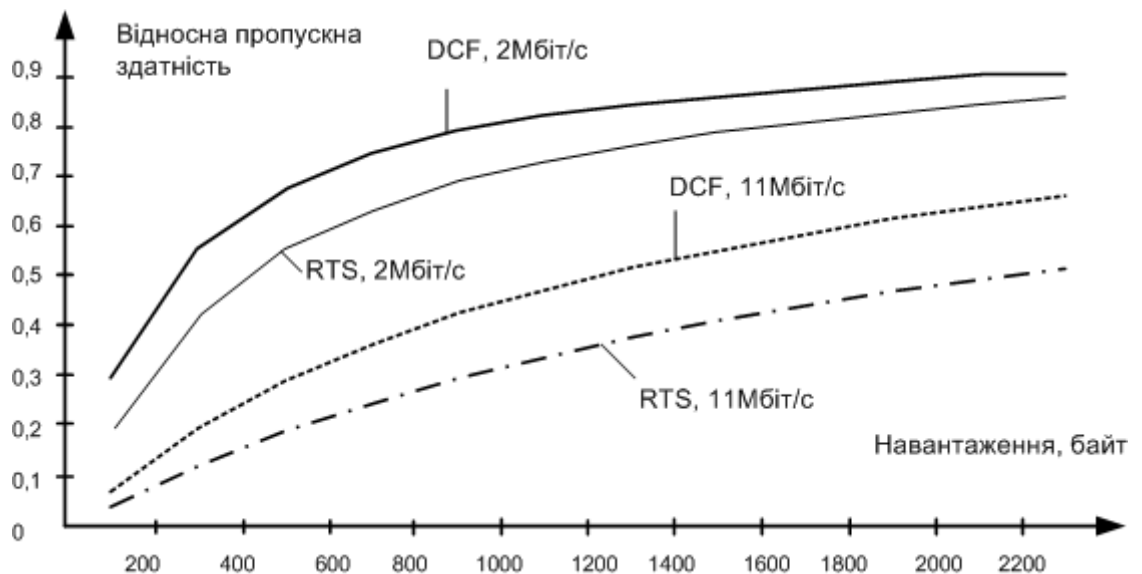


Рисунок 1.19 – Графіки залежності нормованої пропускної здатності безпроводової мережі з однією активною станцією [37]

**1.3.2.1 Обмеження базової моделі процесу передавання потоків даних.** У роботі [14] Дж. Б'янкі запропонував обґрунтування підходів щодо моделювання процесів у безпроводовому каналі мережі стандарту IEEE 802.11b з розподіленою функцією координації (DCF) і навів математичну модель процесу передавання потоків даних у такій мережі. Отримані результати використано для комп'ютерного моделювання для виявлення закономірностей, що мають місце в процесі функціонування безпроводових мереж. Оскільки використані підходи дозволили отримати не дуже складні, але зручні у користування співвідношення, запропонована модель набула поширення.

Візьмемо також до уваги й інші роботи, присвячені аналізу функціональних можливостей безпроводових мереж [34-42].

Вище наведено співвідношення (1.2) для оцінювання максимальної для однієї станції пропускної здатності відповідно до протоколу DCF, яку можна досягти у мережі за умови, що передавання даних здійснює тільки одна станція.

У випадку наявності кількох активних станцій у мережі ситуація інша. За результатами досліджень в [34] було визначено і підтверджено у роботах [36,37], що в разі збільшення навантаження на вузли локальної безпроводової мережі пропускна здатність мережі в цілому збільшується й асимптотично наближається до деякого постійного значення.

На підставі таких результатів було запропоновано ввести поняття «насиченої пропускної здатності», як межі, якої досягає пропускна здатність системи у разі збільшення навантаження комунікаційного каналу.

Насичена пропускна здатність – це найбільша пропускна здатність безпроводової мережі, яку вона може забезпечити у разі одночасного функціонування певної кількості активних станцій.

Розглянемо обґрунтування аналітичних співвідношень для оцінювання величини насиченої пропускної здатності. У роботі [29] досліджено мережу IEEE 802.11, в якій за доступ до безпроводового каналу конкурує  $N$  станцій.

Для отримання результату зроблено припущення, що кожна станція має насичене навантаження. Це означає, що їх буфери завжди містять певний обсяг даних, і в будь-який час у кожній з них є кадр, який необхідно передавати. Крім того, вважають, що переданий кадр ніколи не зазнає спотворення шумами, і що передавання не може бути здійснене тільки в тому разі, коли в каналі відбувається колізія з іншим кадром (це припущення про ідеальні умови каналу не є обов'язковим, як показано в [35, 46]).

Одним із важливих моментів у формуванні моделі функціонування мережі є зауваження про те, що завдяки правилам доступу до каналу, передбаченим у стандарті IEEE 802.11, усі процеси, що відбуваються у мережі можна подати, використовуючи дискретні інтервали часу. Так, станція може передавати тільки тоді, коли канал вільний після завершення інтервалу DIFS. У разі надходження кадру для передавання, вона може запланувати передавання тільки через

дискретний інтервал відстрочки кратний часовому слоту. Тобто інтервал відстрочки згідно з алгоритмом функціонування мережі 802.11 дорівнює певній кількості часових слотів, відрахованих тільки тоді, коли канал був вільним. Традиційне позначення часового слоту –  $\sigma$ .

Зазначимо, що ключовим моментом у формуванні поширених на тепер моделей процесу функціонування мережі є прив'язка до певного часового слоту, що можна охарактеризувати як «концепцію часового слоту».

Щоб визначити максимальну пропускну здатність, яку можна забезпечити в мережі 802.11 з конкурентним доступом, що складається з  $N$  насичених станцій, вважають, що кожна станція випадково і незалежно одержує доступ до інтервалу передавання з імовірністю  $\tau$ . За такого припущення, ймовірність  $P_{idle}$ , того що дана станція не отримає доступу до каналу буде мати значення  $(1 - \tau)$ , а ймовірність того, що жодна станція не одержить доступу до даного інтервалу передавання (елементарний інтервал буде вільним – *idle*), буде визначатись співвідношенням [14, 47]

$$P_{idle} = (1 - \tau)^N. \quad (1.9)$$

Здійснення успішного передавання в результаті отриманого доступу до каналу для кожної станції є подією незалежною. Як наслідок, ймовірність успішного передавання  $P_{scs}$  здійсненого в мережі починаючи з довільного елементарного інтервалу буде визначатись співвідношенням

$$P_{scs} = N\tau(1 - \tau)^{N-1}. \quad (1.10)$$

Інтервал успішного передавання  $T_s$  є однією з ймовірнісних характеристик безпроводового каналу. У деяких джерелах [4, 34] цей інтервал називають віртуальним слотом, або віртуальним інтервалом. Тривалість інтервалу  $T_s$  визначають часом, протягом якого жодна інша станція не може отримати доступ до каналу, оскільки відбувається успішне передавання. Цей інтервал містить не тільки час передавання MPDU, але й інтервали DIFS та ACK після закінчення

успішного передавання.

Інтервал колізії  $T_c$  визначено як проміжок часу, протягом якого інші станції не можуть отримати доступ до каналу, оскільки відбувається колізія. Надалі для зручності ми будемо використовувати терміни «інтервал передавання» та «інтервал колізії», що відповідно мають тривалість  $T_s$  та  $T_c$ .

З урахуванням того, що відстрочку доступу відраховують часовими слотами  $\sigma$ , у проміжках часу, коли канал вільний від передавання та колізій, у [14] запропоновано визначати усереднене значення тривалості системного інтервалу (System Slot) як значення математичного сподівання  $E[SS]$ .

$$E[SS] = P_{idle}\sigma + P_{scs}T_s + (1 - P_{idle} - P_{scs})T_c. \quad (1.11)$$

Якщо усереднене навантаження мережі, переданого протягом системного інтервалу, позначити  $E[PL]$ , тоді пропускну здатність мережі  $S$ , як усереднену кількість інформації, переданої протягом одного системного інтервалу визначено, як [14]

$$\begin{aligned} S &= \frac{P_{scs}E[PL]}{E[SS]} = \frac{P_{scs}E[PL]}{P_{idle}\sigma + P_{scs}T_s + (1 - P_{idle} - P_{scs})T_c} = \\ &= \frac{E[PL]}{T_s + \sigma \frac{P_{idle} + \overline{T_c}(1 - P_{idle} - P_{scs})}{P_{scs}}}. \end{aligned} \quad (1.12)$$

де  $\overline{T_c} = T_c / \sigma$  – відносна тривалість інтервалу колізій, виміряна в одиницях часового слоту.

Оцінювання впливу ймовірності доступу до каналу  $\tau$  на максимальну пропускну здатність каналу роблять шляхом аналізу формули (1.12).

Оскільки величини  $E[PL]$ ,  $\sigma$  й  $T_s$  за означенням мають квазіпостійні не від'ємні значення, пропускну здатність досягає максимуму, коли знаменник має мінімальне значення. Зауважимо також, що для спрощення аналітичної залежності в [14] зроблено припущення, що  $\overline{T_c}$  також є постійною величиною. Це має місце тільки тоді, коли кадри містять фіксований обсяг корисного

навантаження. Зі змінним розміром корисного навантаження, тривалість інтервалу колізії обмежена довжиною найдовшого кадру, що бере участь у цій колізії. З одного боку ймовірність того, що певна кількість кадрів бере участь у колізії залежить від  $\tau$ , а з іншого – значення  $\bar{T}_c$  є функцією  $\tau$ .

З урахуванням (1.9), (1.10) отримано співвідношення

$$\frac{P_{idle} + \bar{T}_c(1 - P_{idle} - P_{scs})}{P_{scs}} = (1 - \bar{T}_c) \frac{(1 - \tau)}{N\tau} + \frac{\bar{T}_c}{N\tau(1 - \tau)^{N-1}} - \bar{T}_c. \quad (1.13)$$

Для даного рівняння було знайдено екстремальне значення шляхом аналізу першої похідної за аргументом  $\tau$ . Значення ймовірності, за якої буде досягнуто максимального значення пропускної здатності каналу позначено  $\tau_{max}$ , тоді

$$(1 - \tau_{max})^N - \bar{T}_c \{N\tau_{max} - [1 - (1 - \tau_{max})^N]\} = 0. \quad (1.14)$$

Для розв'язання рівняння (1.14) в [14] зроблено припущення, що  $\tau_{max} \ll 1$ . За такої умови, вираз (1.14) спрощено із застосуванням апроксимації рядом Тейлора:

$$(1 - \tau_{max})^N \approx 1 - N\tau_{max} + \frac{N(N-1)}{2} \tau_{max}^2. \quad (1.15)$$

Остаточно для  $\tau_{max}$  отримано [28]

$$\tau_{max} = \frac{\sqrt{1 + 2(\bar{T}_c - 1) \frac{(N-1)}{N}} - 1}{(N-1)(\bar{T}_c - 1)} \approx \frac{1}{N\sqrt{\bar{T}_c/2}}. \quad (1.16)$$

Для отримання кінцевого результату зроблено припущення, що значення величин  $N$  і  $\bar{T}_c$  набагато більше одиниці.

В реальних мережах зазначені величини набувають вказаних значень вкрай рідко. Рівняння (1.16) дозволяє лише якісно з'ясувати вплив кожного із зазначених параметрів на максимальне значення ймовірності доступу до каналу та

пропускну здатність.

Співвідношення (1.16) використано для оцінювання іще одного параметра. В [14] зроблено спробу визначити оптимальне значення конкурентного вікна  $CW_{opt}$ . У даному випадку критерієм оптимальності є забезпечення максимального значення пропускної здатності. Розглянуто випадок для станції, яка, замість використовувати двійкове показникове правило формування конкурентного вікна, завжди встановлює у лічильник затримки однаково ймовірне значення з діапазону  $[0, CW_{opt}]$ . На підставі того, що значення лічильника затримки зменшується на одиницю протягом кожного часового слоту, дана станція буде здійснювати передавання в середньому через інтервал, що дорівнює  $(1 + CW_{opt})/2$  часових слотів. Таким чином, імовірність того, що станція зможе передавати у випадково обраному інтервалі, може бути пов'язана зі значенням конкурентного вікна, відповідно до співвідношення [14]

$$\tau = \frac{1}{(1 + CW_{opt})/2}. \quad (1.17)$$

Після підстановки виразу (1.17) у співвідношення для  $\tau_{max}$  (1.16), було отримано приблизне співвідношення

$$CW_{opt} \approx 2N\sqrt{T_c}/2 - 2 \approx N\sqrt{2T_c} \quad (1.18)$$

й зроблено висновок, що  $CW_{opt}$ , у першому наближенні – це величина пропорційна числу конкуруючих станцій  $N$  [14].

Зроблено висновок, що, оскільки  $\bar{T}_c \geq 1$ , найбільш сприятливі умови щодо забезпечення найбільшої пропускної здатності безпроводової мережі в режимі DCF мають місце тоді, коли числове значення конкурентного вікна принаймні в  $\sqrt{2}$  перевищує кількість активних станцій [14, 47].

**1.3.2.3. Оцінка результатів розрахунків граничних значень пропускної здатності у режимі DCF із застосуванням базової математичної моделі.** Для обчислення граничних значень пропускної здатності у режимі DCF за методикою Дж. Б'янкі спочатку визначають параметри  $\sigma$ ,  $T_s$  та  $T_c$ . Часовий слот  $\sigma$  має



тривалість 20 мкс, табл. 1.1.  $T_s$  – це час необхідний для передавання кадру ( $T_{Fr\_Tx}$ ) плюс інтервал DIFS. Для мережі з базовим доступом до каналу можна записати, що

$$T_s = T_{MPDU} + SIFS + T_{ACK} + DIFS. \quad (1.19)$$

Значення  $T_{MPDU}$  й  $T_{ACK}$  визначено рівняннями (1.4) і (1.5), відповідно. Аналогічним чином, у разі організації доступу до каналу у режимі RTS/CTS можна записати

$$T_s = T_{RST} + SIFS + T_{CST} + SIFS + T_{MPDU} + SIFS + T_{ACK} + DIFS. \quad (1.20)$$

Обчислення  $T_c$  буде дещо відрізнятись, оскільки слід взяти до уваги, що після колізії можуть формуватись інтервали DIFS або SIFS. Реально, інтервал DIFS може з'явитись після колізії у невеликих мережах з безпосереднім з'єднанням вузлів, тому в [14] було розглянуто появу після колізії інтервалу SIFS. Отримані результати можна поширити на випадок надходження інтервалу DIFS.

$$T_c = T_{MPDU} + SIFS. \quad (1.21)$$

У випадку, коли кадри мають різні розміри тривалість колізії залежить також від розміру кадрів, що беруть участь у колізії, і, таким чином, впливають на ймовірність здійснення передавання  $\tau$ . У разі застосування режиму RTS/CTS колізії можуть відбуватись тільки протягом кадрів RTS. Таким чином, тривалість колізії є постійною і може бути визначена зі співвідношення

$$T_c = T_{RTS} + SIFS. \quad (1.22)$$

На рис. 1.20 наведено характеристику пропускну здатності мережі 802.11b, що містить десять станцій, як функцію ймовірності доступу до каналу. Характеристики побудовано для двох значень швидкості передавання. Для значень 2 й 11 Мбіт/с побудовано характеристики для базового режиму та режиму RTS/CTS. Для передавання кадрів управління (ACK, RTS, CTS тощо) застосовують мінімальну швидкість (1 Мбіт/с). Наведені криві дають значення

максимальної пропускної здатності отриманої із застосуванням апроксимації величини ймовірності  $\tau$  відповідно до співвідношення (1.16). Зазначено, що апроксимація рівнянням (1.16) є коректною, оскільки дотримано умови  $\tau \ll 1$ . За результатами розрахунків зроблено висновок, що, у разі застосування базового режиму доступу до каналу, пропускна здатність більш чутлива до значення  $\tau$  ніж у режимі RTS/CTS.

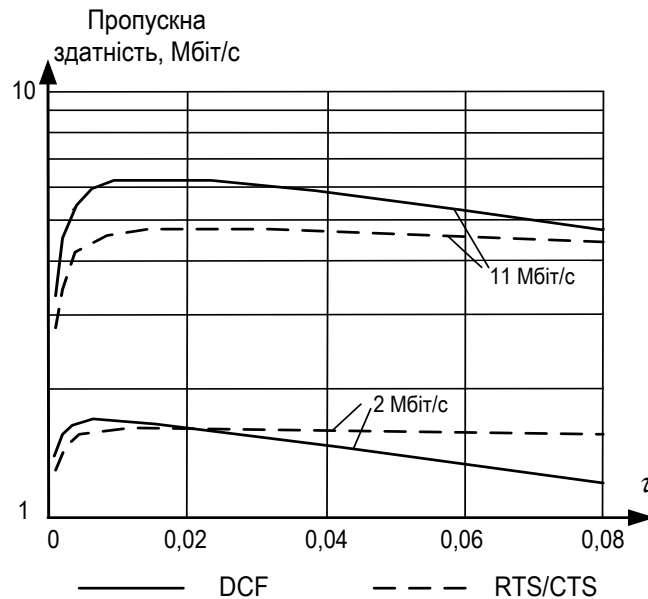


Рисунок 1.20 – Графіки максимальної пропускної здатності безпроводового каналу мережі з числом активних станцій,  $N = 10$  [14]

В роботі [14] зроблено аналіз наведених графіків, але не враховано значення параметрів реальної мережі.

Зазначимо, що на графіку, наведеному на рис 1.20, межі зміни аргументу вибрано не обґрунтовано, оскільки згідно зі співвідношенням (1.17) значенню ймовірності доступу до каналу  $\tau = 0,02$  відповідає значення конкурентного вікна  $CW = 99$ , а значенням  $\tau = 0,04; 0,06; 0,08$  – відповідно значення  $CW = 49; 32; 24$ . Якщо зважити на те, що в більшості специфікацій IEEE 802.11 початкове значення  $CW = 15$ , тоді зрозуміло, що наведені графіки не надають можливості проаналізувати процеси в реальних мережах. Це пов'язано з тим, що в моделі, запропонованій Дж. Б'янкі не встановлено безпосереднього зв'язку між системними параметрами та експлуатаційними характеристиками.

Для оцінювання впливу кількості активних станцій  $N$  на максимально

можливу пропускну здатність мережі було запропоновано зробити заміну

$$K = \sqrt{\bar{T}_c / 2}. \quad (1.23)$$

Із застосуванням апроксимації для оптимального значення  $\tau_{\max}$  (1.15) і з урахуванням того, що  $\bar{T}_c = T_c / \sigma$ , знайдено граничне значення пропускну здатності за умови  $N \rightarrow \infty$  [14].

$$\begin{aligned} \lim_{N \rightarrow \infty} S &= \frac{E[PL]}{T_s + \sigma \frac{P_{idle} + \bar{T}_c(1 - P_{idle} - P_{scs})}{P_{scs}}} = \\ &= \frac{E[PL]}{T_s + \sigma \frac{(1 - \tau_{\max})}{N\tau_{\max}} - T_c + T_c \frac{[1 - (1 - \tau_{\max})^N]}{N\tau_{\max}(1 - \tau_{\max})^{N-1}}} = \\ &= \frac{E[PL]}{T_s + \sigma K - T_c(1 + K + Ke^{1/K})} \end{aligned} \quad (1.24)$$

На підставі отриманого рівняння зроблено висновок, що навіть за умови великої кількості станцій у мережі, її максимальна пропускну здатність обмежена деяким граничним значенням, яке є функцією тільки усередненої тривалості інтервалів передавання та колізій  $T_s$  й  $T_c$ , а також розміру часового слоту.

Зазначимо, що припущення  $N \rightarrow \infty$  є не коректним, оскільки за великої кількості станцій мережа втрачає здатність до функціонування через велику кількість колізій.

У роботі [35] отримано результати, згідно з якими у разі застосування співвідношення (1.24) для безпосереднього обчислення значення  $S_{\max}(\tau)$ , значення пропускну здатності буде асимптотично наближатись до певної величини. Ці результати є дуже наближеними до тих, що наведено на рис.1.19. Так, у разі  $\tau = 0,08$  і швидкості передавання даних 2 Мбіт/с, результати обчислень за формулою (1.24) дають значення пропускну здатності 1,669 і 1,596 Мбіт/с відповідно для режиму базового доступу і режиму RTS/CTS, а для швидкості 11 Мбіт/с – 6,210Мбіт/с (базовий) і 4,763 Мбіт/с (RTS/CTS).

Проаналізуємо модель, що було отримано із застосуванням розглянутих вище підходів [14, 34, 35, 47]. Модель каналу є системою рівнянь для визначення пропускної здатності  $S$  (1.12), ймовірності успішного доступу до каналу під час довільного елементарного часового слоту  $\tau_s$  (1.10), ймовірності виникнення порожнього часового слоту  $p_{idle}$  (1.9).

Проте, відсутні співвідношення щодо визначення таких важливих параметрів як ймовірність виникнення колізій  $p_c$ , та ймовірності доступу до каналу  $\tau$ , які є визначальними складовими зазначеної моделі. Ця обставина обумовлює те, що модель запропоновану в [14] не можна використати безпосередньо для здійснення розрахунків та планування мережі, а можна застосувати лише для якісного оцінювання процесів, що відбуваються в каналі безпроводової мережі.

У роботі [47] на підґрунті розглянутих вище підходів до аналізу безпроводової мережі було отримано співвідношення для визначення ймовірності успішного передавання кадру даних конкретною станцією  $P_{sc}$  за умови необмеженої кількості повторних спроб передати кадр даних з урахуванням можливості послідовного виникнення кількох колізій і відповідного збільшення величини конкурентного вікна  $CW$  не більше ніж  $m$  разів. Отримане в [47] співвідношення має вигляд

$$P_{sc} = \frac{2(1 - p_c)}{(1 - p_c)(W + 1) + p_c W [1 - (2p_c)^m]} \quad (1.25)$$

Подібну модель процесу передавання кадрів для режиму DCF з двійковим показниковим розподілом тривалості інтервалів відстрочки, але для випадку з обмеженим числом повторних запитів на передавання  $R$  наведено у роботі [46]. Для спрощення, під час розроблення цієї моделі було зроблено припущення, що число повторів не перевищує параметра  $R$ , тобто,  $R \leq m$ . За такої умови для визначення ймовірності  $P_{sc}$  було отримано математичний вираз

$$P_{sc} = \frac{2(1-2p_c)(1-p_c^{R+1})}{(1-2p_c)(1-p_c^{R+1}) + W(1-p_c)[1-(2p_c)^{R+1}]} \quad (1.26)$$

Співвідношення (1.25) отримано на підставі припущення, що кількість спроб передати кадр даних не обмежена. Таку умову не застосовують у реальних мережах оскільки в разі великої кількості повторів не виправдано зростає навантаження мережі і виникають неприпустимі затримки передавання кадрів. Крім того, важливе значення має правильне визначення ймовірності колізій.

Згідно зі співвідношенням (1.26) за умови  $p_c = 0,5$  ймовірність успішного передавання дорівнює нулю, що не відповідає фізичній сутності процесу.

Комплексний аналіз функціонування каналу зроблено в [4], але запропоновані кінцеві співвідношення, що є результатом цього аналізу хоча і встановлюють функціональний зв'язок між різними параметрами системи, але не дають можливості безпосередньо застосувати їх для отримання числових оцінок параметрів, що характеризують функціонування реальної мережі. Саме тому в роботах [35] й [39] й інших запропоновано окремі моделі для вирішення конкретних завдань. Крім того, в роботі відомих фахівців у сфері безпроводових мереж А.И. Ляхова й В.М. Вишневського [39] відзначено, що існуючі моделі функціонування каналу дозволяють зробити приблизну оцінку функціональних зв'язків між характеристиками безпроводової мережі і забезпечують прийнятну розрахункову точність в певному діапазоні значень системних параметрів. Так, вони відзначають, що запропоновані ними моделі дають дуже велику похибку у разі наявності двох або трьох активних станцій у мережі. З наведених рівнянь (1.25), (1.26) випливає, що вони є не прийнятними у разі великої кількості активних станцій, що призводить до великої ймовірності виникнення колізій. Саме тому продовжується удосконалення вже існуючих моделей і пошук нових підходів до їх розроблення.

### 1.3.2 Особливості модифікованої методики дослідження пропускної здатності безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11ac

У роботі [41] запропоновано модернізовану модель процесу передавання даних та методику розрахунку пропускної здатності безпроводової мережі стандарту 802.11ac. У процесі обґрунтування методики проаналізовано функціонування мережі, що містить  $n$  однакових мережних вузлів, які мають по  $M$  антен, рис. 1.21. Усі вузли розташовано в зоні взаємної радіовидимості. Розглянуто канал без завад і зроблено припущення, що швидкість передавання кадрів даних і кадрів керування однакова. Усі вузли мають насичене навантаження і передають кадри однакової величини по  $L$  бітів. Передбачено застосування агрегованих кадрів A-MPDU, які призначено певному вузлу. Кожен промінь діаграми спрямованості, призначений конкретному адресату, містить один або кілька просторових потоків. Корисне навантаження кадру A-MPDU передають кількома просторовими потоками, що призводить до відповідного зменшення часу передавання.

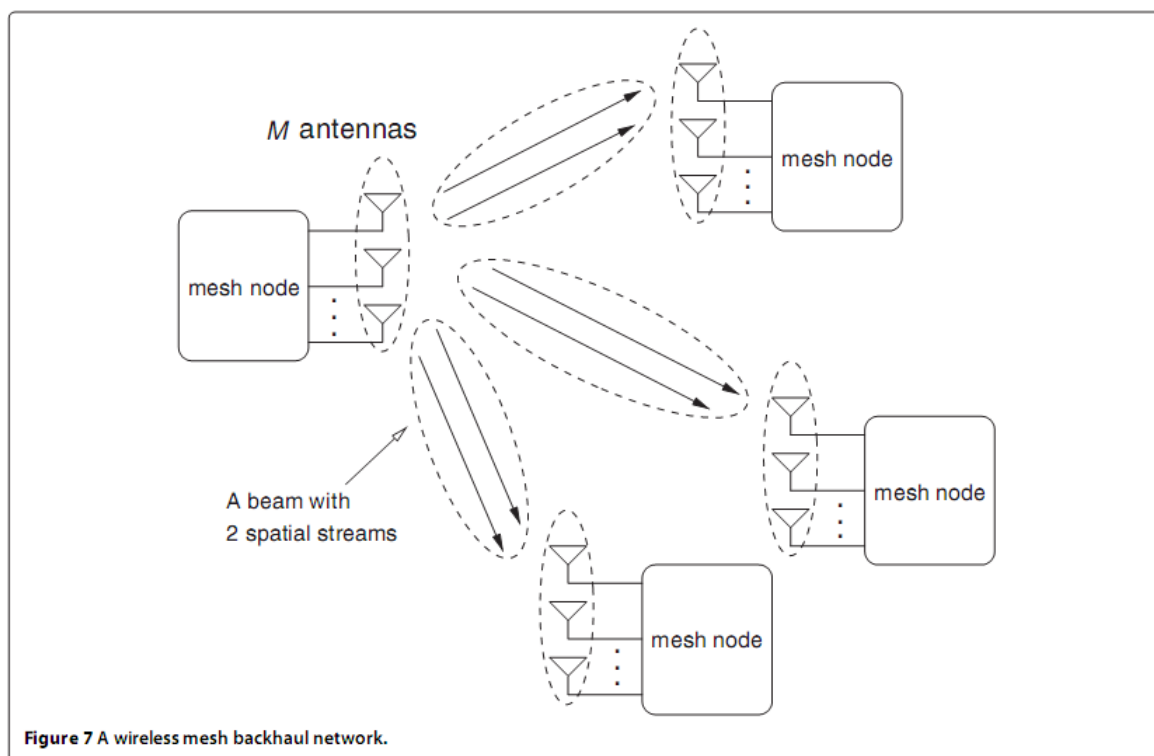


Рисунок 1.21 – Узагальнена схема мережі 802.11ac, запропонована для визначення пропускної здатності безпроводового каналу [41]

Для того, щоб швидкість передавання кожним променем була однаковою зроблено припущення, що у кожному промені використано однакову кількість просторових потоків. Таке припущення обумовлює однаковий час передавання однакових за розміром кадрів кожним променем.

З метою різнобічно проаналізувати особливості функціонування мережі 802.11ac до розгляду запропоновано три схеми просторового розподілу потоків. Такі схеми запропоновано, щоб з'ясувати питання щодо того, що краще використовувати більшу кількість променів чи більшу кількість просторових потоків. У кожній із зазначених схем реалізовано відповідний алгоритм передавання. Запропоновано три алгоритми передавання даних.

Потоко-орієнтований алгоритм, промене-орієнтований алгоритм, потоко-незалежний алгоритм. Кожен із алгоритмів має свої особливості зазначені нижче.

Потоко-орієнтований алгоритм запропоновано для максимізації кількості просторових потоків, призначених одному променю з урахуванням того, що максимальна кількість потоків в одному промені дорівнює 4. Загальна кількість потоків для всіх променів дорівнює 8. Тобто у разі передавання кадру *A-MPDU* певному вузлу буде використано максимально можливу кількість просторових потоків. Така схема призводить до розпаралелювання процесу передавання корисного навантаження, але не зменшує абсолютної величини непродуктивних витрат часу для передавання кадрів керування (*RTS* та *B-ACK*) й заголовка кадру фізичного рівня (*PHY*).

Промене-орієнтований алгоритм запропоновано для максимізації кількості одночасно використовуваних променів з урахуванням, що максимальна їх кількість дорівнює 4. За такого алгоритму агреговані кадри *A-MPDU* буде передано більшій кількості абонентів. Така схема може бути більш ефективною оскільки заголовки кадрів фізичного рівня буде передано усім абонентам паралельно, що призведе до скорочення відносної величини непродуктивних витрат часу. У той же час канал буде зайнятий більш тривалий час і частота передавання кадрів даних буде менше, ніж у попередньому випадку.

Потоко-незалежний алгоритм. У разі реалізації цього алгоритму кількість

потоків для передавання одним променем діаграми спрямованості формують незалежно від того, чи будуть передавати кадри даних *A-MPDU* одному вузлу мережі чи різним.

Для спрощення аналізу процесів у разі застосування базового режиму функціонування (MU-Basic) мережі 802.11ac зроблено припущення, що часовий слот призначено або для реалізації протоколу оцінювання звучання каналу (explicit compressed feedback – ECFB) або для передавання даних. Відповідно колізії можуть виникати або під час передавання службових кадрів NDPA або під час передавання кадрів даних.

Щоб врахувати які кадри зазнали колізії уведено ймовірність  $\gamma$  того, що під час даного часового слота здійснено передавання кадру ECFB, а ймовірність того, що під час часового слота розпочато передавання кадру даних дорівнює  $(1-\gamma)$ .

Незалежно від того, який режим функціонування мережі основний (MU-Basic) чи із запитом на передавання MU-RTS/CTS, вузли мережі здійснюють доступ до каналу із застосуванням лічильника зворотного відліку.

У запропонованій методиці визначення пропускнуої здатності безпроводового каналу 802.11ac запропоновано використовувати такі параметри:

$T_s$  – інтервал часу, протягом якого здійснено успішне передавання кадру;

$T_c$  – інтервал часу, протягом якого мала місце колізія;

$\sigma$  – інтервал елементарного часового слоту (вільний від передавання);

$\tau$  – ймовірність того, що станція мережі буде передавати кадр під час випадково обраного часового слота;

$n$  – кількість активних станцій мережі;

$M$  – кількість антен станції мережі.

На підставі запропонованих підходів отримано співвідношення для визначення ймовірнісних характеристик та пропускнуої здатності каналу, що наведено нижче.

Ймовірність відсутності передавання в інтервалі випадково обраного часового слота:

$$p_e = (1 - \tau)^n. \quad (1.27)$$



Ймовірність успішного передавання кадру через мережу протягом інтервалу, що починається з випадково обраного часового слота:

$$p_s = n \cdot \tau \cdot (1 - \tau)^{n-1}. \quad (1.28)$$

Ймовірність колізії під час передавання кадру в інтервалі, що починається з випадково обраного часового слота

$$p_c = 1 - p_e - p_s. \quad (1.29)$$

Пропускна здатність каналу запропоновано визначати за співвідношенням

$$S = \frac{(1 - \gamma) \cdot p_s \cdot N_f \cdot N_b \cdot n_b \cdot L}{\gamma \cdot (p_s \cdot T_{sci.s} + p_c \cdot T_{sci.c}) + (1 - \gamma) \cdot (p_s \cdot T_{data.s} + p_c \cdot T_{data.c}) + p_e \cdot \sigma}, \quad (1.30)$$

де  $N_f$  – кількість кадрів в кожному блоці А-MPDU;

$N_b$  – кількість променів одночасно спрямованих до кількох вузлів;

$T_{sci.s}$ ,  $T_{sci.c}$ ,  $T_{data.s}$ ,  $T_{data.c}$  – тривалість інтервалів часу успішного передавання та колізій під час передавання кадрів керування (*SCI*) та кадрів даних (*data*) А-MPDU відповідно.

Автори зауважили, що за умови  $\gamma=0$  (що має місце, коли протокол *MU-RTS/CTS* не використовують) рівняння (2.29) набуває вигляду рівняння Дж. Б'янки (1.12).

Для визначення значення  $\tau$ , ймовірності того, що станція отримає можливість передавати свій кадр з урахування  $m$  можливих спроб, що можуть виникнути внаслідок кількох послідовних колізій, авторами запропоновано застосовувати рівняння [41]

$$\tau = \frac{2 \cdot (1 - 2p_c)}{(1 - 2p_c) \cdot (CW_{\min} + 1) + p_c \cdot CW_{\min} \cdot (1 - p_c) \cdot [1 - (2p_c)^m]}. \quad (1.31)$$

$p_c$  є умовною ймовірністю колізії для вузла, який здійснює передавання кадру, і, щонайменше, ще один з  $(n - 1)$  вузлів також передає в цьому інтервалі:

$$p_c = 1 - (1 - \tau)^{n-1}. \quad (1.32)$$

У роботі [41] також запропоновано розрахункові співвідношення для визначення ймовірності  $\gamma$  та тривалості інтервалів успішного передавання та інтервалів колізій.

Із застосуванням наведених співвідношень здійснено оцінювання розрахункової пропускної здатності у разі передавання кадрів даних з корисним навантаженням  $L=2500$  байтів з використанням каналу з частотною смугою 160 МГц,  $m = 6$ ,  $CW_{\min} = 15$ ,  $M = 8$ , модуляція 256-QAM, швидкість коду  $R = 5/6$ . Розглянемо деякі отримані результати, рис. 1.22 та рис. 1.23.

У розглянутій методиці [41] запропоновані розрахункові співвідношення не встановлюють безпосереднього зв'язку між усіма параметрами процесу функціонування мережі в явному вигляді. Так ймовірність колізії (1.32) і ймовірність доступу до каналу врешті виражені одне через інше.

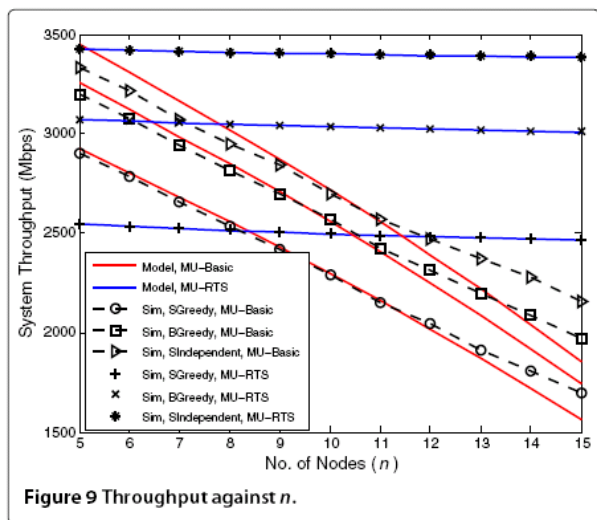


Рисунок 1.22 – Залежність пропускної здатності від кількості станцій

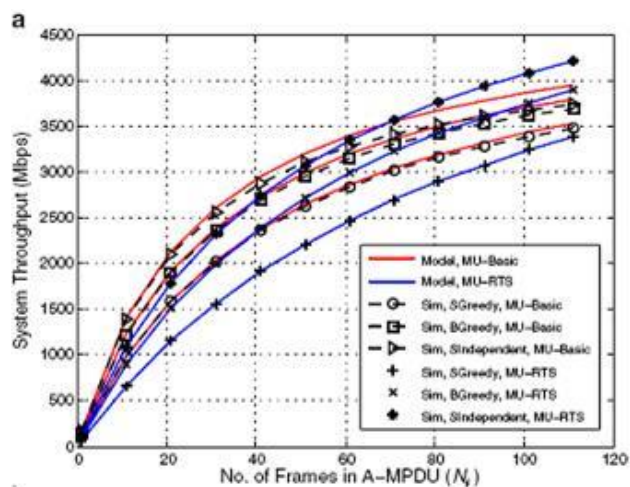


Рисунок 1.23 – Залежність пропускної здатності від кількості агрегованих кадрів

Зазначимо, що співвідношення для визначення ймовірності доступу до каналу в інтервалі довільного часового слоту  $\tau$  (1.31) та інші ймовірнісні параметри запропоновано визначати за тими ж співвідношеннями, що і в моделі Дж. Б'янкі. Тобто модифікована модель має ті ж вади, що й базова модель, і її не можна застосовувати для прогнозування значень експлуатаційних характеристик.

З рис. 1.23 випливає, що у разі передавання одиничних кадрів або агрегованих кадрів, що містять невелику кількість окремих кадрів, пропускна здатність каналу навіть за умови найбільш ефективної модуляції й найбільшої ширини робочої частотної сути (160 МГц) є дуже малою, що суперечить безпосереднім розрахункам [33]. Крім того наведені методики не дозволяють оцінити затримку передавання пакетів та нерівномірність затримки.

### **1.3.3 Особливості розрахункової методики на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна**

Для того, щоб з'ясувати параметри та характеристики процесу передавання мультимедійної інформації засобами безпроводової мережі запропоновано концепцію віртуального конкурентного вікна *VCW* [48]. Ця концепція дещо нагадує концепцію віртуального часового слоту [4], але суттєво відрізняється від неї.

Концепцію віртуального конкурентного вікна запропоновано для оцінювання процесів у безпроводовій мережі, що функціонує за стандартом 802.11 з конкурентним доступом до каналу в насиченому режимі. Основна ідея концепції полягає в тому, що у насиченому режимі, коли кожна станція весь час намагається отримати доступ до каналу для передавання кадру даних, процес функціонування безпроводового каналу можна розглядати як квазістаціонарний.

Усереднено процес передавання кадрів даних кожною станцією мережі можна подати, як такий, що відбувається через однакові проміжки часу й обумовлений використанням постійного за величиною віртуального конкурентного вікна (*VCW*). Концепція дозволяє отримати функціональні залежності як для однієї окремої станції, так і для сегменту безпроводової мережі в цілому.

Концепція віртуального конкурентного вікна не отримала належного розвитку. Хоча в роботі [48] наведено кілька аналітичних співвідношень, що установлюють зв'язок між детермінованими системними параметрами мережі й

стохастичними параметрами процесу передавання кадрів даних, проте деякі співвідношення, зокрема для визначення ймовірності колізій та тривалості віртуального вікна, є наближеними оскільки їх отримано із застосуванням певних спрощень. Також потребують уточнення співвідношення для визначення тривалості середньої затримки передавання, нерівномірності середньої затримки та деякі інші.

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

Тривалість часового інтервалу, що відповідає віртуальному конкурентному вікну залежить від кількості активних станцій у мережі  $N$ , мінімального значення конкурентного вікна  $CW_{min}$ , величини блоку даних  $PL$ , що міститься в кожному кадрі даних, ймовірності колізій  $p_c$ , а також від впливу зовнішнього середовища на розповсюдження радіосигналу, що проявляється у втраті певної кількості кадрів через вплив шумів та завад.

Для розроблення моделі функціонування мережі із застосуванням віртуального конкурентного вікна використано такі припущення [48]:

- кожна станція мережі обов'язково здійснює передавання інформаційного кадру після відліку кожного інтервалу відстрочки, обумовленого значенням лічильника відстрочки обумовленого поточним значенням конкурентного вікна  $CW_i$ , який встановлюють кожен раз перед передаванням кадру випадковим чином;
- за наявності в мережі  $N$  активних станцій, небезпеку колізії для даної станції створює з однаковою ймовірністю решта  $(N-1)$  активних станцій;
- кількість спроб передати поточний кадр даних, що знаходиться першим у черзі даної станції обмежено числом  $R = (m+1)$ ,  $m$  – детермінований параметр станції, що дорівнює максимально можливій кількості повторних спроб здійснити передавання кадру в разі виникнення послідовно кількох колізій;
- усереднена тривалість періоду передавання інформаційного кадру є

величиною однаковою для кожної станції за умови квазістаціонарного режиму функціонування мережі.

В [48] наведено співвідношення для визначення ймовірності колізії, як повної ймовірності виникнення колізії з однією із активних станцій мережі. Це співвідношення отримано за умови однакової ймовірності виникнення колізії з будь-якою іншою активною станцією мережі,  $p_{ic} = 1/CW_1$ :

$$\begin{aligned} p_c &\approx \frac{1}{CW_1} + \frac{1}{CW_1} \left(1 - \frac{1}{CW_1}\right) + \frac{1}{CW_1} \left(1 - \frac{1}{CW_1}\right)^2 + \dots + \frac{1}{CW_1} \left(1 - \frac{1}{CW_1}\right)^{N-2} = \\ &= \frac{1}{CW_1} \sum_{i=1}^{N-2} \left(1 - \frac{1}{CW_1}\right)^{i-1} = 1 - \left(1 - \frac{1}{CW_1}\right)^{N-1}. \end{aligned} \quad (1.33)$$

Для визначення тривалості інтервалу віртуального конкурентного вікна обґрунтовано співвідношення

$$\begin{aligned} VCSW &= \frac{CW_1}{2} (1 - p_c) + \frac{2CW_1}{2} (1 - p_c) p_c + \frac{4CW_1}{2} (1 - p_c) p_c^2 + \dots + \frac{2^m CW_1}{2} (1 - p_c) p_c^m = \\ &= \frac{CW_1 \cdot (1 - p_c)}{2} \cdot \sum_{i=1}^{m+1} (2p_c)^{i-1}. \end{aligned} \quad (1.34)$$

Ймовірність успішного передавання кадру даних кожною активною станцією мережі протягом віртуального конкурентного вікна визначено як повну ймовірність реалізації випадкового процесу з урахуванням усіх можливих повторних спроб передати кадр у разі виникнення кількох колізій поспіль.

$$p_{sc} = (1 - p_c) + (1 - p_c) p_c + (1 - p_c) p_c^2 + \dots + (1 - p_c) p_c^m = (1 - p_c) \frac{1 - p_c^{m+1}}{1 - p_c} = 1 - p_c^{m+1}. \quad (1.35)$$

Знайдено кількість колізій  $N_c$ , як математичне сподівання числа колізій під час реалізації віртуального конкурентного вікна.

$$N_c = \frac{N}{2} p_c + \frac{N}{2} p_c^2 + \frac{N}{2} p_c^3 + \dots + \frac{N}{2} p_c^m = p_c \cdot \frac{N}{2} \cdot \frac{1 - p_c^{m+1}}{1 - p_c}. \quad (1.36)$$

Пропускнну здатність запропоновано обчислювати за формулою

$$S = \frac{N \cdot E[PL_1]}{T_{VCW}} \quad (1.37)$$

де  $E[PL_1]$  - усереднене навантаження, що припадає на один кадр даних.

За умови передавання пакетів однакової величини корисне навантаження складе  $N \cdot PL_1$ . Усереднена тривалість часу реалізації віртуального вікна складе

$$T_{VCW} = N \cdot \bar{T}_{PL} + N_c \cdot \bar{T}_c + \bar{T}_{idle} \quad (1.38)$$

Значення часових інтервалів  $\bar{T}_{PL}$  і  $\bar{T}_c$  треба визначати з використанням співвідношень (2.18, 2.19) та (2.20, 2.21) відповідно. Тривалість інтервалу, коли ніяка станція не передає протягом часу реалізації віртуального конкурентного вікна

$$\bar{T}_{idle} = \sigma \cdot [VCW - N \cdot (1 - p_c^{m+1}) - N_c]. \quad (1.39)$$

Величина пропускної здатності каналу, що припадає на одну активну станцію мережі буде, відповідно, визначатись співвідношенням

$$S_1 = \frac{E[PL_1]}{T_{VCW}}. \quad (1.40)$$

Наведені вище співвідношення утворюють математичну модель процесу передавання потоків даних безпроводової мережею альтернативну до моделі, отриманої на підґрунті концепції часового слота. Проте в цій моделі не враховано зміну кількості станцій, що конкурують за канал, внаслідок реалізації алгоритму збільшення конкурентного вікна для станцій, що потрапили в колізію. Також потребують уточнення співвідношення для визначення витрат часу на вільні від передавання часові слоти, для визначення середньої затримки передавання та нерівномірності цієї затримки. Тобто наведену в [48] математичну модель не можна використати для адекватного прогнозування експлуатаційних

характеристик мережі. Недоліки розглянутої моделі було висвітлено в роботах [49-51]

### Висновки до розділу 1

1. Реальна пропускна здатність радіоканалів безпроводових мереж набагато менше максимальної розрахункової сигнальної швидкості, передбаченої у специфікаціях стандарту IEEE 802.11.

2. Велика кількість абонентського обладнання і обмежені частотні ресурси, виділені для організації безпроводових мереж IEEE 802.11 призвели до значного рівня завад у безпроводових каналах мереж, розгорнутих у густонаселених регіонах, що обумовило складнощі передавання потокової інформації (аудіо та відео) засобами безпроводових мереж.

3. Обґрунтовано, що найбільш поширена математична модель процесу передавання потоків даних безпроводовими мережами IEEE 802.11, запропонована Дж. Б'янкі, не може забезпечити належну точність розрахунків для прогнозування експлуатаційних характеристик мережі. В цій моделі не встановлені безпосередні функціональні зв'язки між системними параметрами та експлуатаційними характеристиками. Ймовірність колізії запропоновано вибирати як величину, що задовольняє співвідношенню  $p_c \ll 1$  без точних розрахунків, а співвідношення для визначення ймовірності успішного передавання втрачає фізичний смисл за умови  $p_c = 0,5$ .

4. З'ясовано, що у модифікованій математичній моделі процесу передавання потоків даних для мережі IEEE 802.11ас враховано технологічні удосконалення, передбачені даною специфікацією, але ця модель має ті ж недоліки, що й модель запропонована Дж. Б'янкі.

5. Визначено, що наявна математична модель, розроблена на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна, містить спрощені співвідношення, що не дозволяє застосовувати безпосередньо наявну модель для практичних розрахунків.

6. Для досягнення мети дисертаційного дослідження необхідно:

– розробити удосконалену математичну модель процесу передавання потоків даних в мережах IEEE 802.11 з конкурентним доступом і метод прогнозування експлуатаційних характеристик та оцінювання якісних показників з її застосуванням;

– дослідити теоретичну межу рівня експлуатаційних характеристик, з урахуванням основних чинників впливу;

– розробити метод оцінювання ефективності використання ресурсів мережі та експериментально перевірити правильність методики оцінювання експлуатаційних параметрів безпроводових мереж IEEE 802.11 з конкурентним доступом.



## **2 УДОСКОНАЛЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ БЕЗПРОВОДОВОЮ МЕРЕЖЕЮ IEEE 802.11**

Метою досліджень, результати яких наведено в цьому розділі, є запропонувати та обґрунтувати математичні співвідношення, що складають удосконалену математичну модель процесу передавання потоків даних безпроводовою мережею стандарту 802.11 в режимі конкурентного доступу до каналу.

### **2.1 Застосування концепції віртуального конкурентного вікна для визначення стохастичних характеристик безпроводової мережі Wi-Fi**

#### **2.1.1 Оцінювання впливу колізій на процес доступу до безпроводового каналу**

Базовою технологією доступу до радіоканалу в мережах всіх специфікацій стандарту 802.11 є технологія конкурентного доступу, яку реалізовано із застосуванням розподіленої функції координації (DCF) безпосередньо або з використанням алгоритму RTS/CTS, за якого кожен вузол мережі перед тим як надіслати дані «в ефір» спочатку надсилає спеціальне коротке повідомлення, яке називається RTS (Ready To Send) і означає готовність цього вузла до відправки даних. У відповідь станція-адресат надсилає відповідь готовності (CTS) прийняти кадр, а всі інші станції, що «чули» кадри RTS та CTS утримуються від передавання на час, зазначений в цих кадрах. Тобто усі станції, що не беруть участь в обміні кадром даних зупиняють свої лічильники зворотного відліку на інтервал часу задекларований в кадрах RTS та CTS.

Алгоритм RTS/CTS був істотно удосконалений для використання в мережах, що функціонують за специфікаціями 802.11n та 802.11ac, але основний принцип під час передавання кадру RTS – принцип конкурентного доступу до середовища – залишився [41, 52].

Хоча в пізніх версіях стандарту 802.11 застосовано додаткові механізми для зменшення ймовірності колізій в мережі з великою кількістю активних станцій, але загроза виникнення колізій залишається, а в умовах значного поширення безпроводових мереж є неминучою. У разі присутності в мережах 802.11n або 802.11ac пристроїв, відповідних більш раннім специфікаціям, або в разі перекриття зон обслуговування точок доступу 802.11n/ac з зонами точок доступу 802.11g/a колізії можуть виникати через адаптацію частотних смуг і перехід точок доступу 802.11n/ac в режими, відповідні специфікаціям 802.11g/a [49].

Для аналізу ймовірнісних показників скористаємось часовими діаграмами, наведеними на рис.1.5, що характеризує процес передавання пакетів даних в режимі з конкурентним доступом DCF, та рис. 1.6, що характеризує процес взаємодії станцій мережі в разі застосування алгоритму RTS/CTS, за якого конкуренція за доступ до каналу має місце тільки під час передавання кадру RTS. Подібна ситуація виникає в сегменті безпроводової мережі 802.11ac, коли станція яка готується до передавання посилає повідомлення з нульовим пакетом даних (NDPA – null data packet announcement) який містить адреси необхідних вузлів, щоб ініціювати процес навчання [41, 50].

Ймовірність колізій в безпроводовій мережі з конкурентним доступом є одним з найважливіших параметрів для визначення пропускної здатності. Для окремої активної станції в мережі з насиченим навантаженням її можна визначити із застосуванням співвідношення (1.33):

$$p_c = 1 - (1 - p_{c1})^{N-1}, \quad (2.1)$$

де  $p_{c1} = 1/CW_{\min}$  – ймовірність колізії даної станції з однією з активних станцій безпроводової мережі;

$N$  – кількість активних станцій в мережі;

$CW_{\min}$  – початкове значення конкурентного вікна (в більшості специфікацій IEEE 802.11  $CW_{\min} = 15$ , а в деяких  $CW_{\min} = 31$ ).

Графіки ймовірності колізії для станції безпроводової мережі наведено на рис.2.1.

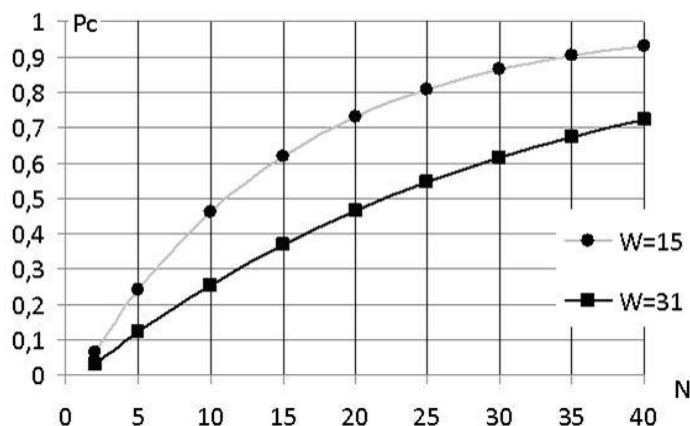


Рисунок 2.1 – Залежність ймовірності колізії для однієї активної станції безпроводової мережі з  $N$  активними станціями в режимі насиченою навантаження

Однак слід враховувати ту обставину, що для безпроводових станцій, які потрапили в колізію, конкурентне вікно збільшується вдвічі, а це в свою чергу обумовлює зменшення кількості станцій, що конкурують за доступ до радіоканалу протягом певного інтервалу [51].

Розглянемо сценарій, за якого всі  $N$  станцій починають одночасно конкурувати за канал, тоді на першій стадії (тривалість стадії відповідає часовому інтервалу реалізації мінімального конкурентного вікна) кількість станцій, що беруть участь у конкуренції за канал становитиме  $N_1 = N$ , а ймовірність колізії становитиме  $p_c^{(1)}$ .

Під час другої стадії для станцій, які потрапили в колізію, конкурентне вікно збільшиться вдвічі і частина станцій вибере число з першої половини цього збільшеного інтервалу, а інша частина – з другої. Оскільки вибір будь-якого числа із збільшеного набору чисел для завантаження лічильника зворотного відліку є однаково ймовірним, то в середньому число станцій, які вибрали число з першої половини конкурентного вікна і з другої половини, буде однаковим. На другій стадії кількість станцій, що конкурують за доступ до каналу, та ймовірність колізії можна визначити співвідношеннями

$$N_2 = N_1 - 0,5p_c^{(1)}N_1, \quad (2.2)$$

$$p_c^{(2)} = 1 - (1 - p_{c1})^{N^{(2)}-1}. \quad (2.3)$$

Деяке число станцій (ті станції, що завантажили в лічильники числа з другої половини збільшеного конкурентного вікна), а саме  $0,5p_c^{(1)}N_1$ , не братиме участі в конкуренції за доступ до каналу. На третій стадії кількість станцій і ймовірність колізії будуть визначатися співвідношеннями

$$N_3 = N_2 - 0,5p_c^{(2)}N_2 + 0,5p_c^{(1)}N_1, \quad (2.4)$$

$$p_c^{(3)} = 1 - (1 - p_{c1})^{N^{(3)}-1}. \quad (2.5)$$

Оскільки ймовірність потрапити в колізію кілька разів поспіль набагато менше, ніж одноразова колізія, і з урахуванням того, що після успішного передавання кадру даних станція повертається в стан першої стадії, для четвертої та наступних стадій можна застосувати співвідношення аналогічні (2.4) і (2.5) для визначення кількості станцій, що конкурують за доступ до каналу, та ймовірності виникнення колізії. Нижче наведено графіки зміни кількості конкуруючих в мережі станцій, рис.2.2 та ймовірності колізій, рис.2.3, залежно від того на якій стадії перебуває безпроводова мережа і скільки активних абонентів ( $N$ ) в мережі.

Як впливає з наведених графіків через виникнення колізій число станцій, які конкурують за доступ до радіоканалу, менше загального числа активних станцій в мережі, і після початку функціонування мережі це число стає постійним вже після кількох умовних стадій доступу до каналу. Кількість станцій, що конкурують за доступ до каналу  $N^*$  залежить мінімального значення конкурентного вікна та  $SW_{\min}$  кількості активних станцій  $N$  [50, 51].

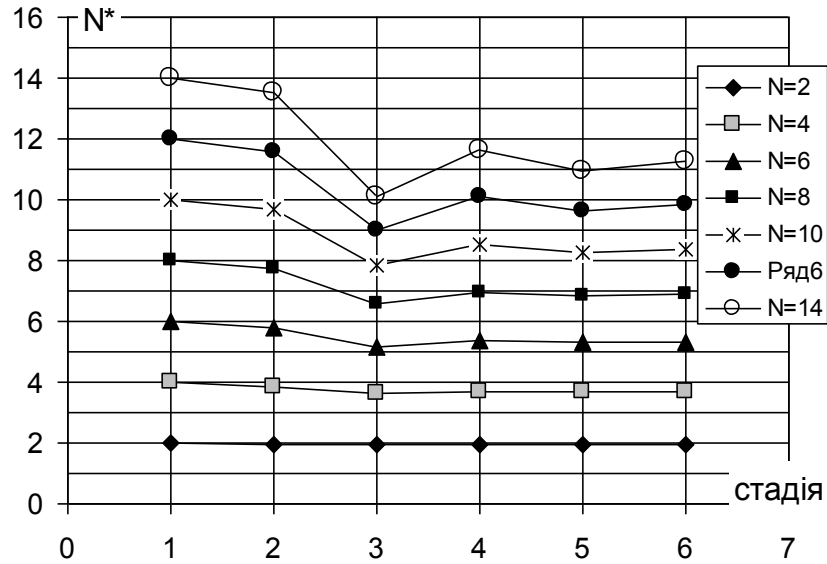


Рисунок 2.2 – Зміна кількості станцій, що конкурують за канал, в процесі встановлення квазістаціонарного режиму

Графік зміни кількості станцій  $N^*$  в безпроводовій мережі з  $N$  активними станціями, що одночасно конкурують за доступ до каналу в насиченому режимі, наведено на рис.2.4.

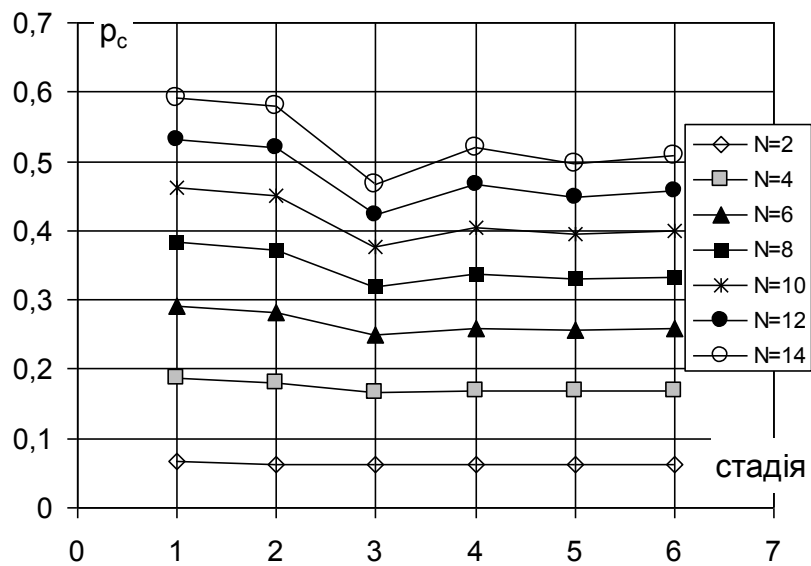


Рисунок 2.3 – Графіки зміни ймовірності колізій в процесі встановлення квазістаціонарного режиму

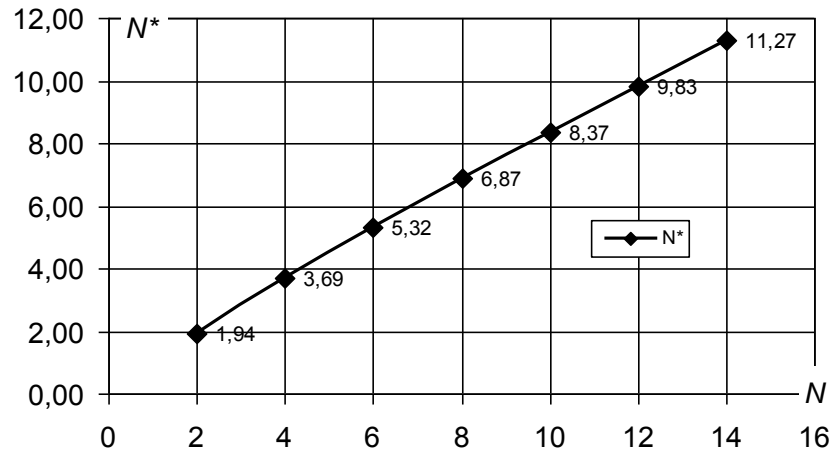


Рисунок 2.4 – Залежність кількості конкуруючих станцій  $N^*$  від загальної кількості активних станцій в безпроводовій мережі  $N$

Наведені графічні залежності дозволяють оцінити ефективність застосування механізму експоненціального двійкового закону для зміни величини конкурентного вікна для станцій, що потрапили в колізію під час спроби передати кадр даних. Як випливає з рис.2.2 та рис.2.3, найбільш ефективний цей механізм на ранніх стадіях повторного доступу до радіоканалу. Якщо час функціонування насиченої мережі перевищує час необхідний для реалізації шести стадій доступу, то кількість станцій, що конкурують за доступ до каналу і ймовірність колізії практично не змінюються. Такий результат може бути пояснений тим, що кожна станція після успішного передавання кадру даних починає нову спробу від початкового значення конкурентного вікна  $CW_{\min}$ . Отже, якщо початкове число активних станцій у безпроводовій мережі приблизно дорівнює числовому значенню конкурентного вікна, в стаціонарному стані насиченої мережі фактична кількість активних станцій, що конкурують за доступ до каналу, буде приблизно на 13% менше через застосування двійкового експоненціального закону для зміни конкурентного вікна. Якщо початкове число активних станцій становитиме лише 30% від значення конкурентного вікна, ефективна кількість активних станцій (тобто така, що одночасно конкурують за доступ до каналу) буде менше на 4--5%. Можна зробити висновок, що збільшення конкурентного вікна в разі повторного передавання кадру є не дуже ефективним засобом боротьби з колізіями.

## 2.1.2 Визначення ймовірності успішного передавання кадру в безпроводовій мережі з конкурентним доступом

Розглянемо тепер ймовірність успішного передавання кадру, яка обумовлена тільки процедурою конкурентного доступу до каналу, без урахування можливості анулювання кадру через тривале очікування доступу до каналу. Оскільки в разі виникнення колізії станція буде здійснювати повторну спробу (всього  $R$  спроб) з використанням збільшеного конкурентного вікна, будемо шукати ймовірність успішної передавання  $p_s$ , як суму ймовірностей успішного передавання під час усіх можливих послідовних спроб [54]. У разі квазістаціонарного процесу в безпроводовій мережі ймовірність колізії на всіх стадіях доступу буде однаковою і дорівнює  $p_c$ .

Під час першої спроби ймовірність успішно передати кадр даних становить  $(1 - p_c)$ . Якщо під час першої спроби сталась колізія, тоді ймовірність успішно передати кадр даних під час другої спроби становить  $p_c(1 - p_c)$ , під час третьої –  $p_c^2(1 - p_c)$ . Ймовірність успішного передавання певного кадру даних як повна ймовірність передавання його протягом  $R$  спроб становитиме

$$\begin{aligned} P_S &= (1 - p_c) + p_c(1 - p_c) + p_c^2(1 - p_c) + p_c^{i-1}(1 - p_c) + \dots + p_c^{R-1}(1 - p_c) = \\ &= (1 - p_c)[1 + p_c + p_c^2 + \dots + p_c^{i-1} + \dots + p_c^{R-1}] = 1 - p_c^R \end{aligned} \quad (2.6)$$

Графіки зміни ймовірності успішного передавання кадру даних у безпроводовій мережі без урахування можливості його анулювання через велику затримку наведено на рис. 2.5. Графік на рис. 2.5 отримано з урахуванням залежності, наведеної на рис. 2.4.

З графіка на рис. 2.5 випливає, що навіть за умови, що кількість активних станцій з насиченим навантаженням становить  $(CW_{\min} - 1)$  внаслідок застосування механізму повторного передавання зі збільшенням значення конкурентного вікна, ймовірність успішного передавання кадру становить не менше 99%.

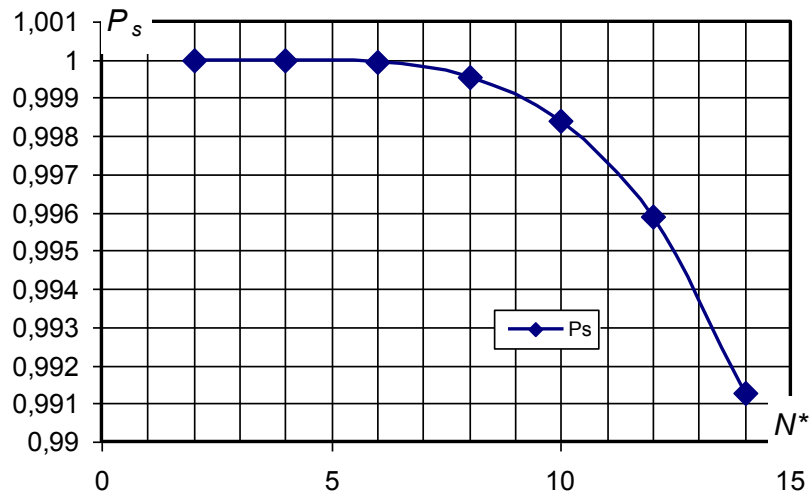


Рисунок 2.5 – Залежність ймовірності успішного передавання кадру від кількості станцій з насиченим навантаженням,  $CW_{\min} = 15$

### 2.1.3 Визначення ймовірності колізії у безпроводовій мережі 802.11 за наявності в ній $N$ активних станцій

Ймовірність виникнення колізії у безпроводовій мережі 802.11 за умови наявності в ній  $N$  активних станцій є важливою характеристикою, яка дозволяє оцінити затримку передавання кадру та нерівномірність цієї затримки, але у попередніх дослідженнях процесів в безпроводових мережах цю характеристикою обходили увагою.

Оцінимо загальну ймовірність колізії в насиченій мережі 802.11 з конкурентним доступом до радіоканалу. В даному випадку мова йде про колізії між будь-якими станціями мережі, що призводить до непродуктивних витрат часу.

Розглянемо уявний сценарій за якого всі активні станції мережі знаходяться на першій стадії доступу до радіоканалу і використовують для завантаження лічильника зворотного відліку число з множини  $\{1, 2, \dots, W\}$ . Тобто в нашому випадку мінімальне значення конкурентного вікна  $CW_{\min} = W$ . Кількість активних станцій  $N$ .

Колізія виникне, якщо дві або більше станцій будуть містити у своїх



лічильниках зворотного відліку однакові числа. Для формування розрахункового співвідношення для визначення ймовірності колізії скористаємось загальним підходом теорії ймовірностей. Тобто будемо визначати цю ймовірність як відношення кількості сприятливих подій до кількості всіх можливих подій. Зазначені величини можна визначити із застосуванням формул комбінаторики.

Розглянемо комбінацію чисел, завантажених у лічильники зворотного відліку  $N$  станцій. У будь-якому лічильнику з однаковою ймовірністю може опинитись число із набору  $\{1, 2, \dots, W\}$ . Тобто таку комбінацію можна розглядати як розміщення із  $W$  по  $N$ . Кількість сприятливих подій знайдемо як різницю кількості розміщень із  $W$  по  $N$  з повторами і кількості розміщень без повторів. Загальну ймовірність колізії  $P_c$  знайдемо як відношення цієї різниці до кількості розміщень із  $W$  по  $N$  з повторами, оскільки саме кількість розміщень повторами визначає загальну кількість комбінацій, що може виникнути в разі наявності в мережі  $N$  активних станцій, що конкурують за доступ до каналу.

На підставі наведених міркувань можна записати

$$P_c = \frac{\tilde{A}_W^N - A_W^N}{\tilde{A}_W^N} = 1 - \frac{W!}{(W - N)!W^N}, \quad (2,7)$$

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

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

Графік залежності (2,7) наведено на рис.2,6. Дане співвідношення дозволяє наглядно оцінити ефективність функціонування сегмента безпроводової мережі з  $N$  станціями в насиченому режимі.

Наведені на рис.2.6 графіки розраховано для деякого гіпотетичного сценарію, в якому не враховано механізм подолання колізій. Інтервал часу, для якого отримано ці залежності дорівнює інтервалу, протягом якого всі станції мережі оновлюють значення лічильників зворотного відліку хоча б один раз.

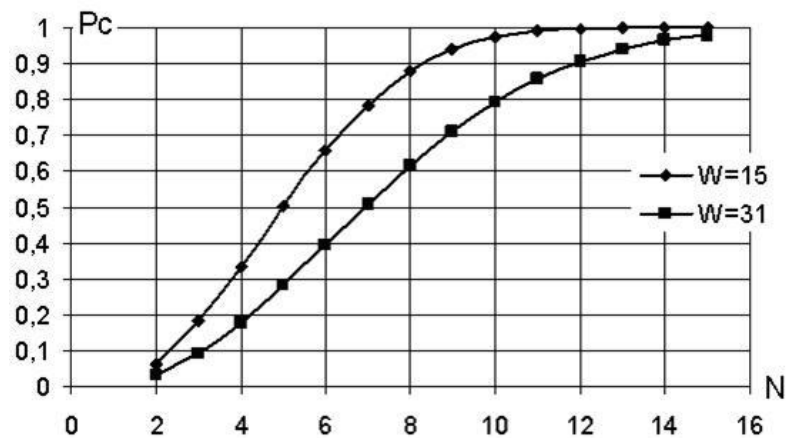


Рисунок 2.6 – Графік залежності ймовірності колізії  $P_c$  в безпроводовій мережі з  $N$  активними станціями [50]

Зокрема, такий розподіл чисел завантажених в лічильники зворотного відліку  $i$ , як наслідок, ймовірність виникнення колізії має місце в насиченій безпроводовій мережі з конкурентним доступом до каналу.

Можна зробити попередній висновок, що в мережі, в якій функціонують станції з насиченим навантаженням, кількість таких станцій не має перевищувати 25% від початкового значення конкурентного вікна  $CW_{min}$ , оскільки в разі більшої їх кількості ймовірність колізії перевищує 0,33 ( $CW_{min}=15$ ) і 0,6 ( $CW_{min}=31$ ). Слід очікувати, що за таких значень ймовірності колізій будуть мати місце значні затримки часу передавання та нерівномірність затримки.

## 2.2 Визначення кількості колізій та вільних часових слотів в насиченій мережі

Згідно з [48] віртуальне конкурентне вікно – це деяке усереднене число, що дорівнює кількості вільних часових слотів, відрахованих кожною активною станцією в проміжках між передаванням двох послідовних кадрів у режимі насиченого навантаження.

Знайдемо величину віртуального конкурентного вікна  $VCW$ , як значення математичного сподівання, для випадку двійкового показникового закону збільшення конкурентного вікна  $CW$  в разі виникнення колізії, передбаченого стандартом 802.11 як основного механізму подолання колізій [41, 47, 53].

Розглянемо сценарій за якого станція з насиченим навантаженням безперервно передає кадри даних протягом тривалого часу. За таких умов певні кадри буде передано з першої спроби, якщо колізії не виникне, з другої спроби, якщо під час першої спроби виникне колізія, а також з усіх інших можливих спроб. Якщо б не було колізій станція передавала б кадри даних у середньому через  $\frac{CW_1}{2}$  часових слотів. Ймовірність того, що станція передасть кадр під час першої спроби за наявності колізій в мережі дорівнює  $(1 - p_c)$ . Аналогічно, якщо станція потрапить один раз в колізію, ймовірність чого  $p_c$ , вона буде в середньому передавати через  $\frac{2CW_1}{2}$  часових слотів. З урахуванням того, що кількість спроб передати кадр даних у разі виникнення колізій становить  $R$  значення віртуального конкурентного вікна можна визначити як

$$\begin{aligned} VCW &= \frac{CW_1}{2}(1 - p_c) + \frac{2CW_1}{2}(1 - p_c)p_c + \frac{4CW_1}{2}(1 - p_c)p_c^2 + \dots + \frac{2^R CW_1}{2}(1 - p_c)p_c^R = \\ &= \frac{CW_1 \cdot (1 - p_c)}{2} \cdot \sum_{i=1}^{R+1} (2p_c)^{i-1}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

На рис.2.7 наведено графік зміни величини віртуального конкурентного вікна залежно від кількості активних станцій з насиченим навантаженням.

Графік на рис.2.7 отримано з урахуванням залежностей, наведених на рис. 2.3 та рис. 2.4. Як і слід було очікувати кількість вільних часових слотів, які кожній станції в середньому доводиться відраховувати, перед передаванням кадру, збільшується нелінійно із збільшенням кількості активних станцій. Із застосуванням співвідношення (2.8) можна безпосередньо визначити кількість вільних часових слотів, що наявні в інтервалі часу реалізації віртуального конкурентного вікна, тобто

$$n_{idle} = VCW. \quad (2.9)$$

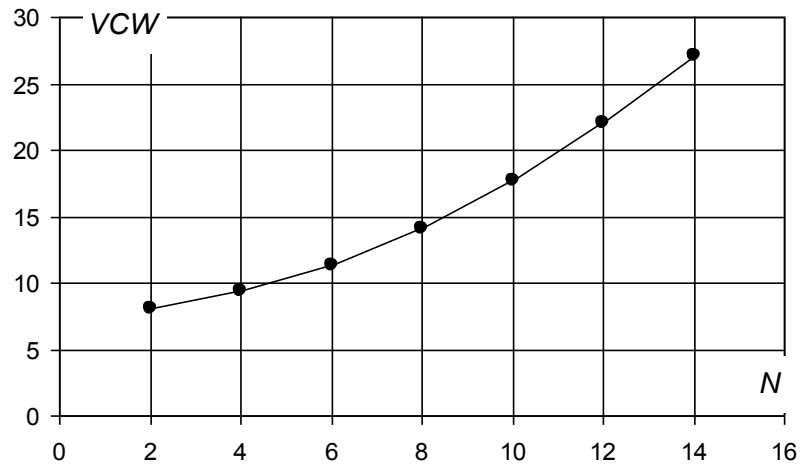


Рисунок 2.7 – Графік залежності віртуального конкурентного вікна  $VCW$  від кількості активних станцій  $N$  для випадку  $CW_{\min} = 15$

Важливою характеристикою мережі, що впливає на всі якісні показники є кількість колізій, що відбувається під час передавання кадру даних.

У межах віртуального конкурентного вікна кожна станція мережі передає  $N$  кадрів, тобто в середньому кожна із  $N$  станцій передає по одному кадру. На підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна можна визначити кількість колізій  $N_c$ , що відбувається в середньому під час передавання  $N$  кадрів даних.

Зробимо оцінювання кількості колізій з припущення, що в кожній колізії бере участь дві станції, оскільки така колізія є найбільш імовірною. Отримана оцінка буде верхньою межею кількості колізій, що може мати місце в насиченій мережі за час реалізації віртуального конкурентного вікна.

Кожна станція мережі може потрапити в колізію з імовірністю  $p_c$ . Але, якщо одна станція потрапила в колізію, то це означає, що іще одна станція потрапила в колізію. Тобто в колізії бере участь колізійна пара. Оскільки в колізії бере участь  $N$  станцій, то на підставі припущення, що в колізії бере участь тільки дві станції, кількість колізійних пар буде дорівнювати  $N/2$ . Протягом реалізації конкурентного вікна будуть мати місце колізії, що відбуваються на першій, другій і всіх інших можливих  $R$  стадіях доступу до каналу. Знайдемо число  $N_c$  як математичне сподівання числа колізій під час реалізації віртуального конкурентного вікна.

$$N_c = \frac{N}{2} p_c + \frac{N}{2} p_c^2 + \frac{N}{2} p_c^3 + \dots + \frac{N}{2} p_c^R = p_c \cdot \frac{N}{2} \cdot \frac{1 - p_c^{R+1}}{1 - p_c}. \quad (2.10)$$

Графік залежності (2.9) наведено на рис. 3.8 для мережі, в якій початковим налаштуванням застосовано  $CW_{\min}=15$ , що має місце для більшості специфікацій IEEE 802.11.

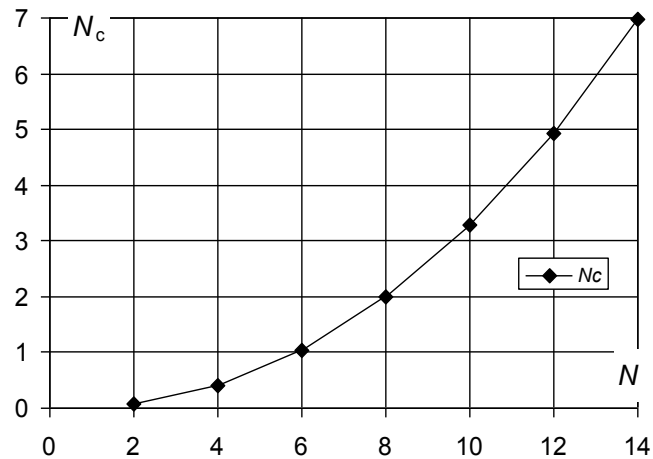


Рисунок 2.8 – Графік зміни кількості колізій  $N_c$  залежно від кількості активних станцій з насиченим навантаженням  $N$

Як і слід очікувати з фізичних міркувань, у разі наявності малої кількості станцій в мережі колізії будуть виникати рідко і їх кількість значно менше кількості переданих кадрів. За наявності шести станцій в мережі буде мати місце одна колізія на шість переданих кадрів. Зі збільшенням кількості активних станцій кількість колізій нелінійно зростає і за наявності чотирнадцяти активних станцій в мережі на чотирнадцять переданих кадрів буде відбуватись 7 колізій. Тобто на кожні два передані кадри буде відбуватись одна колізія.

### 2.3 Оцінювання параметрів якості обслуговування безпроводової мережі

Визначимо, яким чином параметри, що характеризують якість передавання мультимедійного контенту залежать від параметрів безпроводової мережі.

Визначимо такі показники якості обслуговування, як затримка передавання пакета даних через безпроводовий канал, ймовірність втрати пакета даних,

джитера, пропускна здатність безпроводового каналу.

### 2.3.1 Середня затримка

Середню затримку  $\bar{\tau}$  визначають як усереднене значення усіх *затримок*, що виникли під час передавання усіх блоків даних даного трафіка:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_i^{N^{(b)}} \tau_i, \quad (2.11)$$

де  $N^{(b)}$  – загальна кількість доставлених блоків даних;

$\tau_i$  – час затримки  $i$ -пакета.

Середня затримка передавання пакета даних через безпроводовий канал  $\bar{\tau}$ , згідно з концепцією віртуального конкурентного вікна, буде дорівнювати тривалості реалізації цього вікна. Такий взаємозв'язок впливає безпосередньо із визначення віртуального конкурентного вікна. Для середньої затримки можна записати:

$$\bar{\tau} = T_{VCW}. \quad (2.12)$$

Час реалізації віртуального конкурентного вікна можна визначити за співвідношенням

$$T_{VCW} = N \cdot \bar{T}_{PL} + N_c \cdot \bar{T}_c + n_{id} \cdot \sigma; \quad (2.13)$$

де  $N$  – кількість активних станцій у мережі;

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

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

$\sigma$  – тривалість елементарного часового слота.

Перший доданок в правій частині (2.12) визначає час, витрачений всіма станціями на успішне передавання в середньому по одному кадру на кожну станцію. Другий доданок визначає час, витрачений на колізію усіма станціями.

Третій доданок визначає час протягом якого в межах віртуального конкурентного вікна усі станції знаходились у стані декременту своїх лічильників і не передавали кадри даних (канал був вільним).

### 2.3.2 Нерівномірність затримки (джитер)

Значення нерівномірності затримки – джитера знайдемо за загальною формулою:

$$\sigma^{(\tau)} = \tau^{(max)} - \tau^{(min)} = 2\sqrt{D(\tau)}, \quad (2.14)$$

де  $\tau^{(max)} = \bar{\tau} + \sqrt{D(\tau)}$ ,  $\tau^{(min)} = \bar{\tau} - \sqrt{D(\tau)}$ .

Для визначення дисперсії скористаємось загальною формулою

$$D(\tau) = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_i^{N^{(b)}} (\tau_i - \bar{\tau})^2, \quad (2.15)$$

де  $N^{(b)}$  – загальна кількість переданих кадрів даних;  $\tau_i$  – затримка передавання окремого кадру даних.

На підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна, для визначення дисперсії скористаємось максимальним значеннями затримки передавання під час кожної із можливих спроб. У цьому випадку вираз (2.14) набуде іншого вигляду, а саме:

$$D(\tau) = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_{j=1}^{m+1} N_j \cdot (\tau_j^* - \bar{\tau})^2, \quad (2.16)$$

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

Оскільки в квазістаціонарному режимі протягом часу реалізації віртуального конкурентного вікна успішно буде передано певну частину кадрів з першої спроби, певну частину – з другої і певну частину – з кожної іншої можливої спроби, для розрахунку джитера можна обмежитись інтервалом

реалізації віртуального конкурентного вікна.

Кількість кадрів, переданих під час  $j$ -ої спроби можна визначити зі співвідношення:

$$N_j = N \cdot p_c^{j-1} \cdot (1 - p_c) \quad (2.17)$$

Максимальну затримку кадру даних у насиченій мережі у разі його успішного передавання під час  $j$ -ої спроби доступу до каналу можна визначити за співвідношенням:

$$\tau_j^* = (N \cdot P_s \cdot \bar{T}_{PL} + n_c \cdot \bar{T}_c) \cdot \frac{2^{j-1} \cdot (CW_{\min} + 1)}{VCW} + \sigma \cdot 2^{j-1} \cdot (CW_{\min} + 1) \quad (2.18)$$

Згідно з концепцією віртуального конкурентного вікна вважаємо, що процеси передавання кадрів, колізії та вільні часові слоти розподілені в часі рівномірно. Коефіцієнтом  $\frac{1}{VCW}$  враховуємо скільки актів передавання кадрів і колізії припадає в середньому на один вільний часовий слот, що має місце під час реалізації віртуального конкурентного вікна з відомим значенням  $CW_{\min}$  та кількістю активних станцій в мережі  $N$ .

Таким чином першим доданком у правій частині (2.18) враховано максимальний час очікування, поки в межах інтервалу реалізації віртуального вікна успішно передають усі станції мережі. Вважаємо, що станція для якої розраховуємо максимальну затримку передає кадр в кінці інтервалу обумовленого максимальним значенням конкурентного вікна  $CW_j$ , завантаженого в лічильник зворотного відліку. Другим доданком враховано безпосередньо час очікування, обумовлений декрементом лічильника зворотного відліку під час наявності вільних часових слотів [53].

### 2.3.3 Пропускна здатність безпроводового каналу

Для оцінювання ефективності функціонування безпроводового каналу потрібно мати можливість оцінити максимально можливу пропускну здатність за



ідеальних умов і пропускну здатність з урахуванням реальних чинників, що впливають на процес функціонування безпроводової мережі.

Максимальну пропускну здатність каналу будемо розраховувати як деяке граничне значення без урахування шумів, електромагнітних завад і перешкод на фізичному рівні і без урахування колізій. Тобто, це такі умови, коли кадри передає одна станція з насиченим навантаженням. За таких умов, максимальну пропускну здатність можна визначити із застосуванням співвідношення [14]

$$S_{\max} = \frac{E[PL_1]}{E[T_s] + \sigma \cdot CW_{\min} / 2}, \quad (2.20)$$

де  $E[PL_1]$  і  $E[T_s]$  – усереднені значення корисного навантаження і часу передавання одного кадру даних,  $\sigma$  – тривалість часового слота,  $\sigma \cdot CW_{\min} / 2$  – усереднене число значення відстрочки між актами передавання двох послідовних кадрів даних подане в одиницях часових слотів.

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

$$S = \frac{N \cdot E[PL_1] \cdot P_s}{T_{VCW}}. \quad (2.21)$$

Розглянемо вплив завад на пропускну здатність безпроводового каналу та якісні показники безпроводової мережі.

За наявності завад в каналі будуть виникати спотворені кадри (erroneous frame). Кількість таких кадрів зручно характеризувати загальноприйнятим коефіцієнтом помилкових пакетів PER (Packet Error Ratio). У разі виникнення спотвореного кадру буде здійснено повторне передавання із застосуванням механізму подолання колізій. Тому, для врахування впливу завад у всіх отриманих вище співвідношеннях, замість ймовірності колізій треба використати ймовірність спотворення кадру [53]

$$p_{ef} = p_c + PER - p_c \cdot PER. \quad (2.22)$$

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

Під час визначення пропускної здатності безпроводової мережі з урахуванням впливу завад треба враховувати, що завади можуть призводити до спотворення як кадрів даних, так і кадрів керування.

Для каналу, в якому реалізовано безпосередній конкурентний доступ час реалізації віртуального конкурентного вінка слід обчислювати за співвідношенням

$$T_{VCW} = N \cdot T_{PL} + N \cdot PER \cdot T_{PL} + n_c T_c + \sigma \cdot VCW, \quad (2.23)$$

Для каналу, що функціонує в режимі RTS/CTS час реалізації віртуального конкурентного вінка слід обчислювати за співвідношенням [53]

$$T_{VCW} = N \cdot T_{PL} + N \cdot PER \cdot (T_{PL} + T_{RTS}) + n_c T_c + \sigma \cdot VCW, \quad (2.24)$$

де  $T_{RTS}$  – витрати часу на передавання кадру RTS у мережі, що функціонує в режимі RTS/CTS.

### 2.3.4 Ймовірність втрати пакету

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

$$P^{(rs)} = 1 - P_s. \quad (3.25)$$

## Висновки до розділу 2

1. На підґрунті концепції віртуального вікна розроблено удосконалену математичну модель процесу передавання потоків даних в безпроводових мережах стандарту IEEE 802.11 з конкурентним доступом, що містить повний набір математичних співвідношень для прогнозування якісних показників та експлуатаційних характеристик безпроводової мережі.

2. Обґрунтовано підхід для визначення ймовірності колізій в насиченій мережі з урахуванням повторного передавання кадрів, що потрапили в колізію. Показано, що кількість активних станцій насиченої мережі, які безпосередньо беруть участь в конкуренції за доступ до каналу передавання, менше ніж загальна кількість активних станцій в мережі. Відносне зменшення кількості конкуруючих станцій зростає зі збільшенням кількості активних станцій в мережі. У разі наявності чотирьох станцій в конкуренції бере участь на 7% менше, а в разі 14 станцій на 13% менше загальної кількості активних станцій.

3. Математичні співвідношення для визначення експлуатаційних характеристик безпроводових мереж отримано на підґрунті детального аналізу функціональних зв'язків між системними параметрами (кількість активних станцій, кількість повторних спроб передавання, мінімальне значення конкурентного вікна) та стохастичними параметрами мережі (ймовірність колізій, ймовірність успішного передавання, ймовірність втрати пакету, кількість вільних часових слотів тощо).

4. Сферу застосування удосконаленої моделі розширено для безпроводових мереж, що зазнають впливу завад на процес передавання даних. У разі наявності завад замість ймовірності колізій рекомендовано використовувати умовну ймовірність з урахуванням ймовірності спотворення кадрів завадами.

### **3 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ СПЕЦИФІКАЦІЙ IEEE 802.11 a/n**

Метою даного розділу є з'ясувати граничні значення експлуатаційних характеристик мереж стандарту IEEE 802.11 найбільш поширених специфікацій. Дослідження здійснено із застосуванням запропонованого в дисертаційній роботі методу оцінювання значень експлуатаційних характеристик, що ґрунтується на застосуванні удосконаленої математичної моделі. Визначено такі показники: пропускну здатність безпроводової мережі з насиченим навантаженням, затримку передавання пакета даних через безпроводовий канал, ймовірність втрати пакета даних та джитер залежно від кількості активних абонентів у режимі конкурентним доступом. Дослідження зроблено для двох типів транспортних протоколів: дейтаграмного (UDP) та протоколу гарантованого з'єднання (TCP).

Знання оцінок якісних показників мережі на етапі проектування є важливим чинником для забезпечення якісних телекомунікаційних та інформаційних мережних послуг.

#### **3.1 Метод оцінювання граничних значень експлуатаційних характеристик**

Метод оцінювання граничних значень експлуатаційних характеристик безпроводових мереж IEEE 802.11 з конкурентним доступом полягає в тому, що спочатку треба визначити прогнозні значення ймовірнісних характеристик мережі для різної кількості активних станцій і різних обсягів корисного навантаження в кадрах даних із застосуванням удосконаленої моделі, потім визначити часові характеристики процесу передавання з урахуванням технологічних особливостей передбачених у певній специфікації стандарту 802.11 і на завершення визначити експлуатаційні характеристики як функції обсягів навантаження в кадрах даних та кількості активних станцій.

Технологія конкурентного доступу до каналу є базовою технологією стандарту IEEE 802.11 і залишається базовою технологією в специфікаціях 802.11n/ac. Зокрема, її застосовують на етапі прослуховування каналу і визначення параметрів каналу для організації передавання сигнальних потоків різним абонентам як в режимі з одним просторовим потоком, так і в режимі з кількома просторовими потоками [41, 55].

Для того, щоб визначити основні закономірності зміни якісних показників мережі, залежно від кількості активних станцій, розглянемо спочатку зміну пропускну здатності мережі стандарту IEEE 802.11a із застосуванням алгоритму RTS/CTS [47, 51]. Часову діаграму процесу передавання кадру даних під час реалізації цього алгоритму наведено на рис.1.6.

Математичні співвідношення, що складають удосконалену математичну модель процесу передавання інформаційних потоків в безпроводових мережах стандарту 802.11 з конкурентним доступом, наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Розрахункові співвідношення для безпроводової мережі IEEE802.11 в режимі конкурентного доступу

	Параметр мережі	Формула	Прим.
1	Ймовірність колізії для окремої станції мережі на початковій стадії	$p_c = 1 - (1 - p_{c1})^{N-1}$ $p_{c1} = 1/CW_{\min}$	(3.1)
2	Кількість активних станцій з насиченим навантаженням, що конкурують за канал	$N^{(R)} = N^{(R-1)} - 0,5p_c^{(R-1)}N^{(R-1)} +$ $+ 0,5p_c^{(R-2)}N^{(R-2)}$ <p style="text-align: center;"><math>R</math> – кількість повторних спроб</p>	(3.4)
3	Ймовірність колізії для станції мережі в мережі з насиченим навантаженням	$p_c^{(R)} = 1 - (1 - p_{c1})^{N^{(R)}-1}$	(3.5)
4	Ймовірність успішного передавання кадру даних з урахуванням усіх стадій	$P_s = 1 - [p_c^{(R)}]^R$	(3.6)
5	Ймовірність виникнення колізії в мережі з $N$ активними станціями, $W = CW_{\min}$	$P_c = \frac{\tilde{A}_W^N - A_W^N}{\tilde{A}_W^N} = 1 - \frac{W!}{(W - N)!W^N}$	(3.7)
6	Величина віртуального конкурентного вікна ( $VCW$ )	$VCW = \frac{CW_1 \cdot (1 - p_c)}{2} \cdot \sum_{i=1}^{R+1} (2p_c)^{i-1}$	(3.8)
7	Кількість вільних слотів за час реалізації $VCW$	$n_{idle} = VCW$	(3.9)

продовження табл. 3.1

8	Кількість колізій за час реалізації VCW	$N_c = p_c \cdot \frac{N}{2} \cdot \frac{1 - p_c^{R+1}}{1 - p_c}, p_c = p_c^{(R)}$	(3.10)
9	Середня затримка передавання кадру	$\bar{\tau} = T_{VCW}$	(3.12)
10	Час реалізації VCW	$T_{VCW} = N \cdot \bar{T}_{PL} + N_c \cdot \bar{T}_c + n_{id} \cdot \sigma$	(3.13)
11	Нерівномірність середньої затримки (джитер)	$\sigma^{(\tau)} = \tau^{(max)} - \tau^{(min)} = 2\sqrt{D(\tau)},$	(3.14)
		$D(\tau) = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_{j=1}^{m+1} N_j \cdot (\tau_j^* - \bar{\tau})^2$	(3.16)
12	Максимальна пропускна здатність безпроводового каналу	$S_{max} = \frac{E[PL_1]}{E[T_s] + \sigma \cdot CW_{min} / 2}$	(3.20)
13	Розрахункова пропускна здатність безпроводового каналу	$S = \frac{N \cdot E[PL_1] \cdot P_s}{T_{VCW}}$	(3.21)
14	Ймовірність втрати кадру даних	$P^{(rs)} = 1 - P_s$	(3.25)

## 3.2 Дослідження експлуатаційних характеристик безпроводових мереж специфікацій IEEE 802.11a

### 3.2.1 Оцінювання пропускної здатності безпроводового каналу IEEE 802.11a в режимі безпосереднього конкурентного доступу

Як еталонну величину для порівняння будемо використовувати пропускну здатність безпроводового каналу, розраховану для сюжету, за якого в мережі активною є одна станція. Максимальну пропускну здатність у разі застосування певної схеми модуляції та кодування (MCS) треба розраховувати для каналу, в якому одна станція безперервно передає кадри даних іншій станції або точці доступу (наприклад відео репортаж в реальному часі). Вважаємо, що станції розташовані на відносно невеликій відстані так, щоб не було значного ослаблення сигналу через просторове загасання.

Максимальну пропускну здатність каналу будемо розраховувати як деяке граничне значення без урахування шумів, завад і перешкод на фізичному рівні. Колізії в каналі відсутні. За таких умов, максимальну пропускну здатність треба визначати за співвідношенням (2.20) [52].

Проміжок часу  $E[T_s]$ , протягом якого здійснено успішне передавання кадру

з урахуванням часових діаграм (рис.1.6), може бути визначений для режиму *DCF* за співвідношенням

$$E[T_s] = T_{MPDU} + SIFS + T_{ACK} + DIFS, \quad (3.1)$$

де  $T_{MPDU}$  – тривалість інтервалу часу, протягом якого має місце передавання безпосередньо кадру даних,  $T_{ACK}$  – тривалість інтервалу часу, протягом якого передається кадр підтвердження *ACK* мережі IEEE80.11.

Службові інтервали, що входять до складу зазначених співвідношень, в специфікації 802.11a мають такі значення:  $SIFS = 16$  мкс,  $\sigma = 9$  мкс,  $DIFS = 2\sigma + SIFS = 34$  мкс. Тривалість кадру *ACK* в разі застосування для його передавання сигнальної швидкості 24 Мбіт/с становить 28 мкс.

Розглянемо окремо випадки, коли пакети потоку даних містять 64 і 1500 байтів корисного навантаження. Розглянемо також два варіанти транспортних протоколів. У першому варіанті пакети будемо передавати за алгоритмом протоколу *TCP*, а в другому – за алгоритмом *UDP*. У разі використання протоколу *TCP* найменший заголовок містить 24 байти, а також на кожний переданий адресату пакет у зворотному напрямку до відправника надходить пакет підтвердження *ACK\_TCP*. Крім того пакет супроводжується контрольною сумою обсягом 4 байта. У разі ж застосування протоколу *UDP* заголовок складається з 8 байтів.

Розрахунок пропускної здатності для потоку *TCP*, що містить блоки даних з  $PL = 64$  байта, без урахування колізій, інтервалів очікування і втрат пакетів через наявність шумів у каналі в разі застосування сигнальної швидкості 24 Мбіт/с (найбільша обов'язкова швидкість для специфікації 802.11a) наведено в табл.3.2.

Під час розрахунку розглянуто найбільш загальний випадок, за якого на мережному рівні до пакета даних додається ще 8 байтів згідно з протоколом *SNAP*, а на *MAC* рівні додається 28 байтів інформації *TCP*. Тобто, в разі застосування протоколу *TCP*, до кожного блоку даних буде додано на каналному рівні ще 36 байтів. Пакет даних 64 байта на каналному рівні матиме обсяг  $(64 + 36)$  байтів = 100 байтів = 800 бітів. Один символ OFDM передає 192 біта

кодованої послідовності зі швидкістю каналного коду  $1/2$ . Тобто інформаційних бітів буде вдвічі менше – 96. 800 інформаційних бітів породжують 1600 кодованих бітів, для передавання яких треба:  $192 = 8,3(3) \rightarrow 9$  символів OFDM.

Таблиця 3.2 – Приклад розрахунку максимальної пропускної здатності  $S_{\max}$  для пакетів з корисним навантаженням 64 байта

	Кадр даних <i>TCP</i>	<i>ACK TCP</i>	$T_c$
<i>DIFS</i> , мкс	34	16 ( <i>SIFS</i> )	34
$\Delta t_{TCP\_дані}$	20 мкс + 9·4 мкс = 56 мкс	20 мкс + 3·4 мкс = 32 мкс	68 мкс
<i>SIFS</i> , мкс	16	16	16
802.11a <i>ACK</i>	20 мкс + 1·4 мкс = 24 мкс	28 мкс	
Час передавання кадру, мкс	34+56+16+24=130	16+32+16+28=92	34+68+16=118
$T_s$ , мкс	130+92=222		118
$S_{\max}$	<i>PL</i> : $T_s = 512:236 = 2, 306$ Мбіт/с		

Тривалість одного символу становить 4 мкс. На фізичному рівні 802.11a пакет супроводжується додатковим заголовком синхронізації приймача і службової інформації (преамбула) тривалістю 20 мкс [13]. Результати розрахунків максимальної пропускної здатності для блоків корисного навантаження різної величини (від  $PL=64$  до  $PL=1500$  байтів) наведено на рис. 4.1 [52].

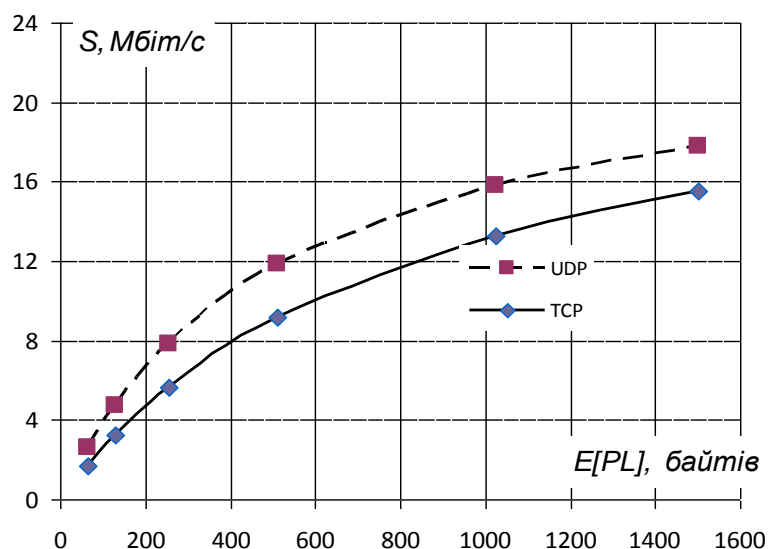


Рисунок 3.1 – Графік залежності максимальної пропускної здатності від розміру блоку даних корисного навантаження для мережі IEEE802.11a

Маркерами на графіку позначено пропускну здатність для потоків даних з однаковим вмістом корисної інформації в одному кадрі: 64, 128, 256, 512, 1024 та



1500 байтів.

У разі використання протоколу TCP для передавання кадрів даних з корисним навантаженням від 64 до 1500 байтів пропускна здатність змінюється від 1,52 Мбіт/с до 14,78 Мбіт/с, а в разі використання протоколу UDP – від 2,59 Мбіт/с до 17,8 Мбіт/с. У разі використання транспортного протоколу UDP розрахункова пропускна здатність каналу за наявності тільки однієї станції з насиченим навантаженням буде на 70% більше ніж у разі використання протоколу TCP для малих кадрів (корисне навантаження 64 байта) і на 20% – для великих (корисне навантаження 1500 байт).

Визначимо тепер розрахункове значення пропускної здатності безпроводового каналу мережі за наявності  $N$  станцій в насиченому режимі з урахуванням колізій із застосуванням співвідношення (2.21). Пропускна здатність каналу визначаємо як швидкість передавання корисної інформації протягом часу реалізації віртуального конкурентного вікна (3.13). Вважаємо, що всі кадри даних всіх станцій мають однаковий обсяг корисного навантаження. Так само, як і наведених вище розрахунках враховуємо всі непродуктивні витрати, пов'язані з протоколами різних рівнів.

Для розрахунку використовуємо формули (2.13), (2.6), (2.9), (2.10), а також формулу для розрахунку тривалості колізії (1.21):

$$\bar{T}_c = T_{MPDU} + DIFS.$$

Розраховані за формулою (2.21) значення пропускної здатності для мережі 802.11a (системна швидкість передавання 24 Мбіт/с) в разі використання протоколів TCP і UDP наведено на рис. 3.2 та рис. 3.3. Ці графіки отримано для режиму безпосередньої конкуренції за канал, без використання кадрів керування RTS та CTS.

Графіки на рис. 3.2 та рис. 3.3 дозволяють кількісно оцінити деградацію пропускної здатності, яка має місце внаслідок збільшення кількості колізій в мережі у разі збільшення кількості активних станцій.

Зменшення пропускної здатності каналу із збільшенням кількості активних

станцій згідно з формулою (2.13) обумовлено двома чинниками: необхідністю повторного передавання кадрів даних, що потрапили в колізію і збільшенням кількості вільних часових слотів внаслідок реалізації алгоритму подолання колізій.

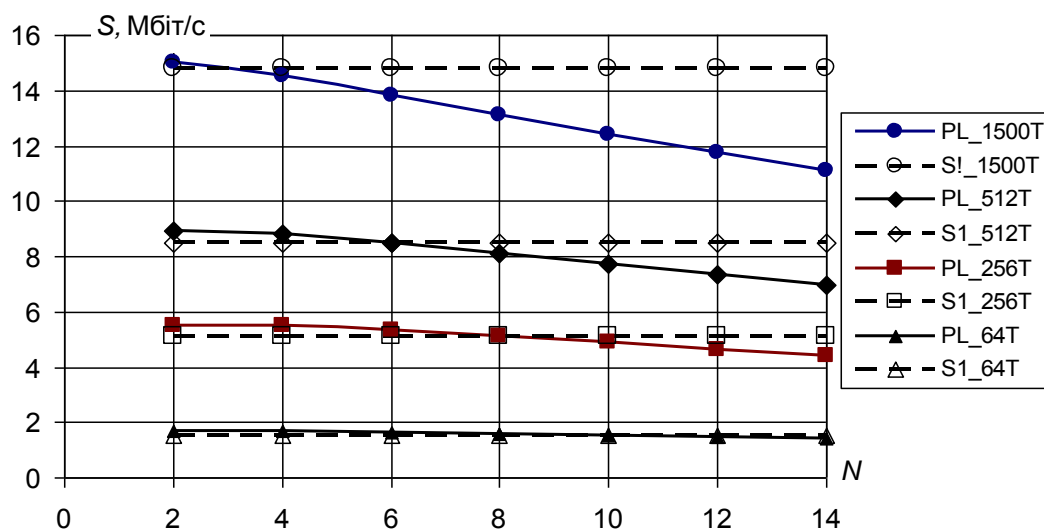


Рисунок 3.2 – Графіки залежності пропускної  $S$  здатності каналу безпроводової мережі від кількості активних станцій  $N$  у разі використання протоколу TCP

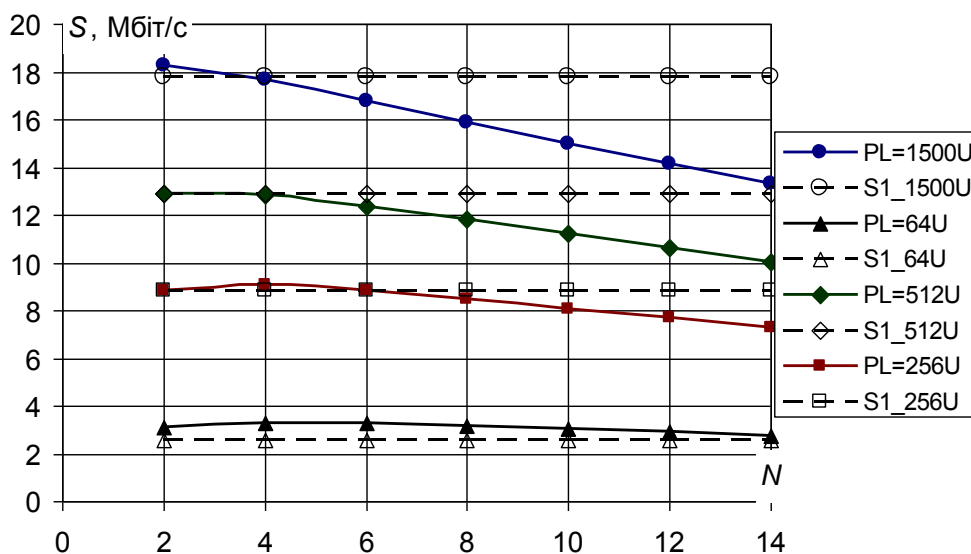


Рисунок 3.3 – Графіки залежності пропускної здатності каналу безпроводової мережі від кількості активних станцій  $N$  при використанні протоколу UDP

У разі малого корисного навантаження кадрів даних ( $PL=64$  байти) й використання протоколу UDP пропускна здатність каналу за наявності  $N$  активних станцій більше, ніж у разі наявності тільки однієї станції, рис. 3.3.

Пропускна здатність каналу для 4-6 станцій становить 2,29-2,26 Мбіт/с порівняно з 2,59 Мбіт/с. Збільшення становить 25,9%.

У разі збільшення кількості активних станцій в мережі зі збільшенням корисного навантаження в кадрах даних пропускна здатність каналу трохи зростає за наявності 2-6 станцій (залежно від навантаження), але з подальшим збільшенням кількості станцій інтегральна пропускна здатність каналу зменшується.

Як впливає з графіка рис. 3.2 у разі застосування протоколу TCP, якщо передавати кадри з корисним навантаженням 1500 байтів, внаслідок наявності колізій в безпроводовому каналі його пропускна здатність зменшується майже лінійно від 15,04 Мбіт/с (дві активні станції) до 11,1 Мбіт/с (чотирнадцять активних станцій). Тобто зменшення інтегральної пропускної здатності становить 26,2%.

За тих же умов в разі застосування протоколу UDP пропускна здатність каналу зменшується від 18,27 Мбіт/с (дві станції) до 13,33 Мбіт/с (чотирнадцять станцій), тобто на 27%.

Розглянемо тепер, яка частка загальної пропускної здатності каналу припадає на одну активну станцію мережі з насиченим навантаженням і як ця частка змінюється залежно від кількості активних станцій. Розділимо пропускну здатність безпроводового каналу, наведену на рис. 3.2 та рис. 3.3, порівну між усіма активними станціями. Графіки залежності пропускної здатності безпроводової мережі, що припадає на одну станцію наведено на рис. 3.4 та 3.5.

У разі, коли мережа IEEE 802.11a функціонує в режимі з системною швидкістю 24 Мбіт/с, протокол TCP, за наявності двох активних станцій з насиченим навантаженням частка пропускної здатності, що в середньому припадає на одну станцію, становить 0,837 Мбіт/с (для кадрів з корисним навантаженням 64 байти) й 7,521 Мбіт/с (1500 байтів).

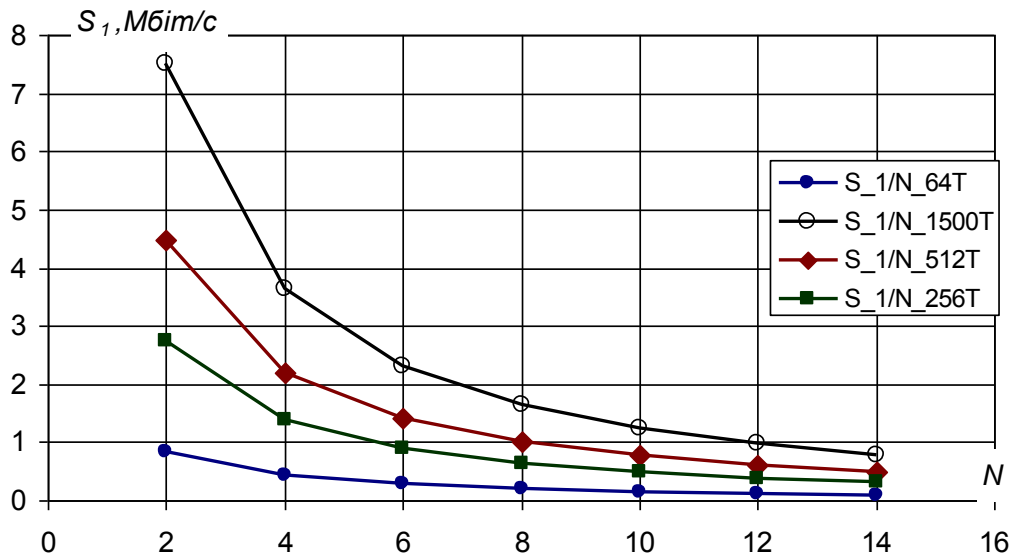


Рисунок 3.4 – Графіки залежності пропускної здатності  $S_1$  що припадає на одну станцію мережі в разі використання протоколу TCP

Якщо в мережі чотирнадцять активних станцій, тоді на одну станцію припадає 0,1 Мбіт/с (для кадрів з корисним навантаженням 64 байти) й 0,793 Мбіт/с (1500 байтів).

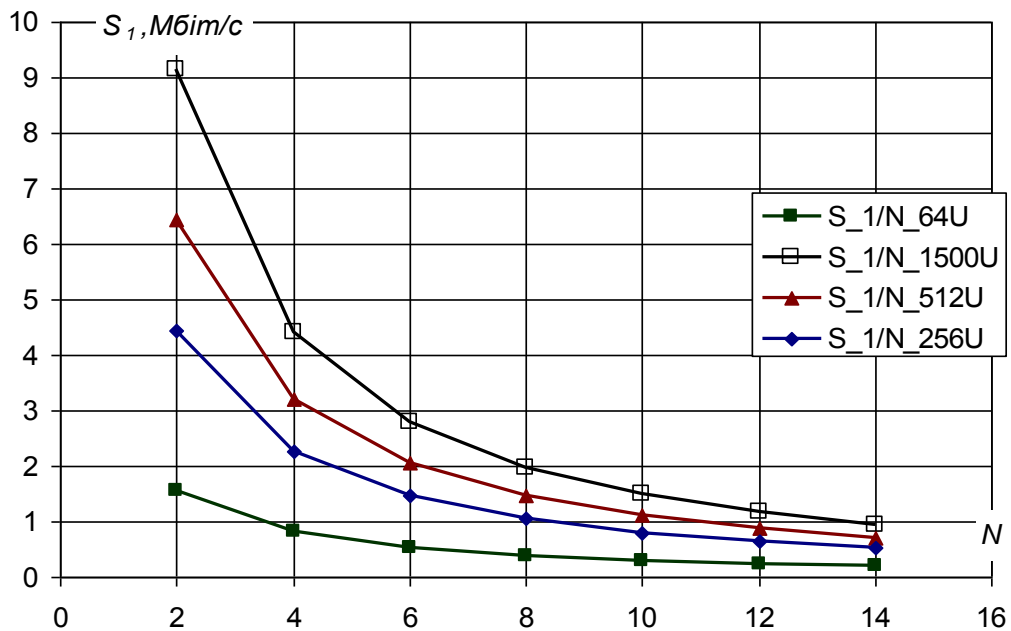


Рисунок 3.5 – Графіки залежності пропускної здатності  $S_1$  що припадає на одну станцію мережі в разі використання протоколу UDP

У разі використання протоколу UDP пропускна здатність, що припадає на одну станцію в мережі з двома активними станціями становить 1,552 Мбіт/с (64

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

### 3.2.2 Оцінювання пропускної здатності безпроводового каналу IEEE 802.11 а в режимі конкурентного доступу з попереднім повідомленням (RTS/CTS)

Максимальну пропускну здатність безпроводового каналу у режимі RTS/CTS визначимо за таких же умов, що й в 3.1.1 [52]. У такому разі пропускну здатність можна розрахувати за формулою (2.20). Усереднену тривалість інтервалу успішного передавання одного кадру даних  $E[T_s]$  визначимо із застосуванням співвідношень (1.20) та (1.22):

$$E[T_s] = T_{RST} + SIFS + T_{CST} + SIFS + T_{MPDU} + SIFS + T_{ACK} + DIFS,$$

$$\bar{T}_c = T_{RTS} + DIFS$$

де  $T_{MPDU}$  – час передавання безпосередньо кадру даних, який залежить від схеми кодування і модуляції;

$T_{RST}$  й  $T_{CTS}$  – тривалість передавання кадрів оповіщення і підтвердження готовності приймати дані.

Службові інтервали, зазначені у наведених вище співвідношеннях, такі ж, як і в попередніх розрахунках:  $SIFS = 16$  мкс,  $\sigma = 9$  мкс,  $DIFS = 2\sigma + SIFS = 34$  мкс. Кадр RTS можна передавати із сигнальною швидкістю 6, 12 або 24 Мбіт/с. Найчастіше ці кадри передають зі швидкістю  $S = 6$  Мбіт/с, що забезпечує високу надійність передавання такого кадру (модуляція BPSK, швидкість коду  $R=1/2$ , кількість інформаційних бітів в одному символі OFDM – 24 біт/символ). У такому разі  $T_{RST} = 48$  мкс (20 мкс – преамбула, 28 мкс – 4мкс · 7 символів OFDM),  $T_{CTS} = 40$  мкс (20 мкс – преамбула, 20 мкс – 4мкс · 5 символів OFDM).

Результати розрахунків пропускної здатності безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11a, у разі системної швидкості 24 Мбіт/с у режимі RTS/CTS наведено на рис.4.6 та рис.4.7.

За ідеальних умов передавання, без урахування затримок оброблення сигналу апаратними засобами, у разі функціонування однієї активної станції з насиченим навантаженням пропускна здатність каналу безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11a в режимі RTS/CTS може відрізнятись в кілька разів, порівняно із заявленою швидкістю, рис. 3.6. Так, у разі системної швидкості 24 Мбіт/с, максимально можлива швидкість передавання даних за корисного навантаження кожного кадру даних 64 байти становить 1,23 Мбіт/с, за умови використання протоколу транспортного рівня TCP, і 1,67 Мбіт/с – за використання протоколу UDP.

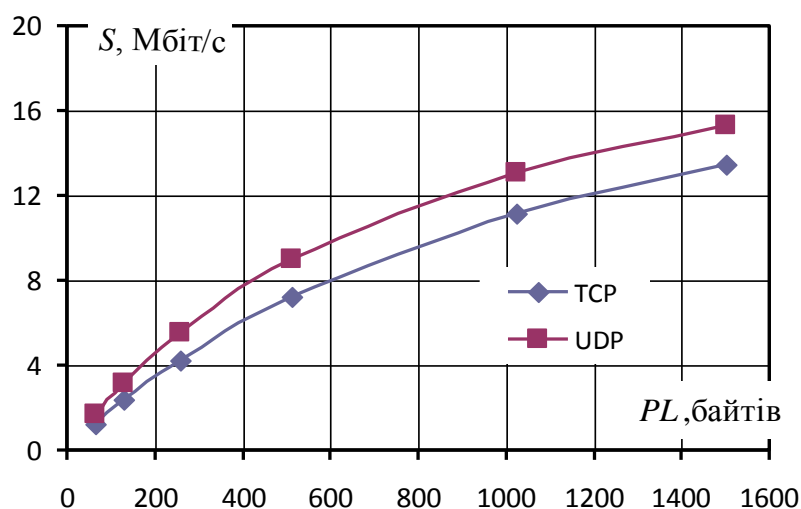


Рисунок 3.6 – Залежність максимальної пропускної здатності безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11a в режимі RTS/CTS для системної швидкості 24 Мбіт/с

У разі більшого корисного навантаження кадру, швидкість передавання збільшується і за навантаження 1500 байтів становить 13,45 Мбіт/с і 15,35 Мбіт/с, у разі застосування протоколів TCP і UDP, відповідно. За малих обсягів корисного навантаження в кадрі (64 байта), застосування протоколу UDP забезпечує швидкість передавання на 36% більше, ніж у випадку застосування протоколу TCP, а для кадрів з корисним навантаженням  $PL=1500$  байтів, це збільшення швидкості становить 14,1%.

Можна також відзначити, що у разі малого корисного навантаження кадрів

(64 байта) і використання протоколу UDP, можлива пропускна здатність каналу в 14 разів менше, ніж заявлена системна швидкість (1,67 Мбіт/с замість 24 Мбіт/с), а за великого навантаження – в 1,5 рази (15,35 Мбіт/с, замість 24 Мбіт/с). Таку розбіжність величин реальної пропускної здатності (швидкість передавання корисного навантаження) й системної швидкості обумовлено великою відносною часткою витрат на передавання службової інформації та інтервали очікування.

Розрахункову максимальну пропускну здатність безпроводового каналу, в разі врахування впливу колізій, наведено на рис. 3.7. Пунктирними лініями наведено пропускну здатність каналу за ідеальних умов для однієї станції в мережі.

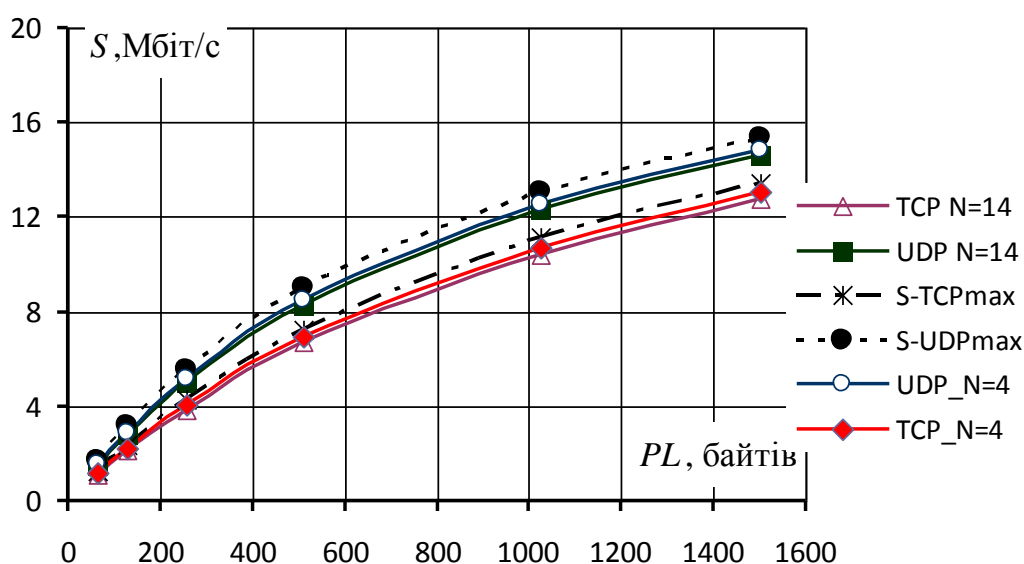


Рисунок 3.7 – Залежність максимальної пропускної здатності безпроводової мережі стандарту 802.11a в режимі RTS/CTS, з урахуванням колізій

Графіки, зображені суцільними лініями відповідають режимам з чотирма та чотирнадцятьма активними станціями в мережі. Відзначимо, що зі зміною кількості активних станцій пропускна здатність каналу практично не змінюється і залежить від величини корисного навантаження в кадрі даних та типу транспортного протоколу. У порівнянні з пропускною здатністю каналу за ідеальних умов в разі використання протоколу UDP, пропускна здатність зменшується на 4,8% (навантаження кадру 1500 байт) та 11,4% (навантаження кадру 64 байта), й на 3% (1500) та 6,5% (64), в разі використання протоколу TCP.

### 3.2.3 Оцінювання параметрів якості обслуговування безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11a

Показниками якості обслуговування для мережі передавання даних є затримка передавання пакета даних через безпроводовий канал, нерівномірність затримки (джитер), ймовірність втрати пакета даних [55, 56].

**3.1.3.1. Середня затримка.** Середню затримку  $\bar{\tau}$  знайдемо із застосуванням формул (2.12), (2.13):

$$\bar{\tau} = T_{VCW}$$

$$T_{VCW} = N \cdot \bar{T}_{PL} + N_c \cdot \bar{T}_c + n_{id} \cdot \sigma.$$

На рис. 3.8 та рис. 3.9 наведено графіки залежності усередненого часу затримки передавання кадру даних через канал як функцію величини корисного навантаження в кадрі в мережах IEEE 802.11a з різною кількістю активних станцій, у разі застосування системної швидкості 24 Мбіт/с. Величини часових інтервалів наведено в 4.1.2, кількість колізій за час реалізації віртуального та інші ймовірнісні характеристики – в табл.2.1. Транспортний протокол UDP.

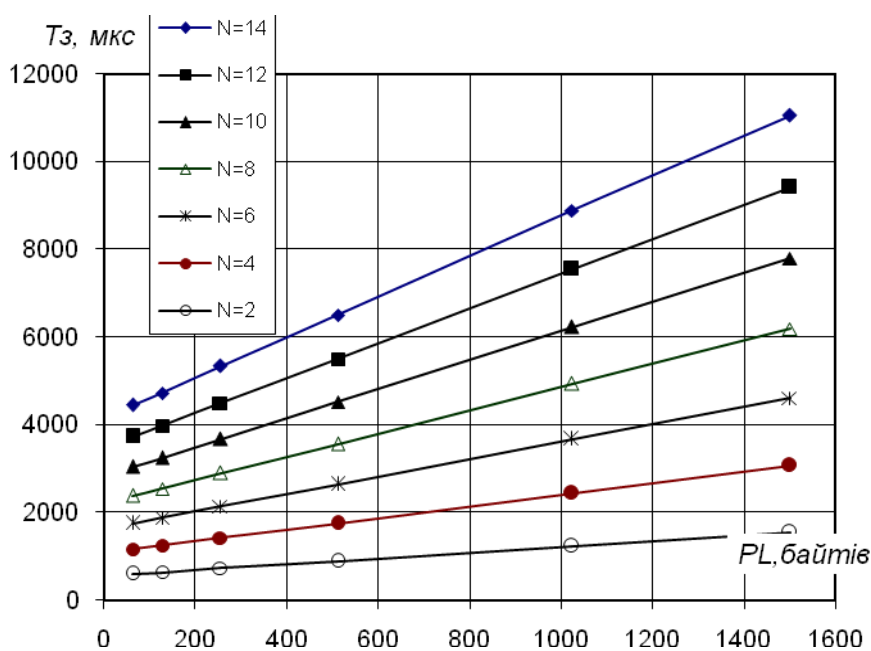


Рисунок 3.8 – Залежність усередненого часу затримки від величини корисного навантаження в кадрі PL за системної швидкості 24 Мбіт/с, режим RTS/CTS



Розрахункові величини мають такі значення:

– час успішного передавання пакету UDP  $T_{PL} = 126$  мкс (PL = 64 байти),  
 $T_{PL} = 602$  мкс (PL = 1500 байтів);

тривалість інтервалу колізії  $T_c = DIFS + RTS = 34 + 48 = 82$  мкс (протокол UDP)

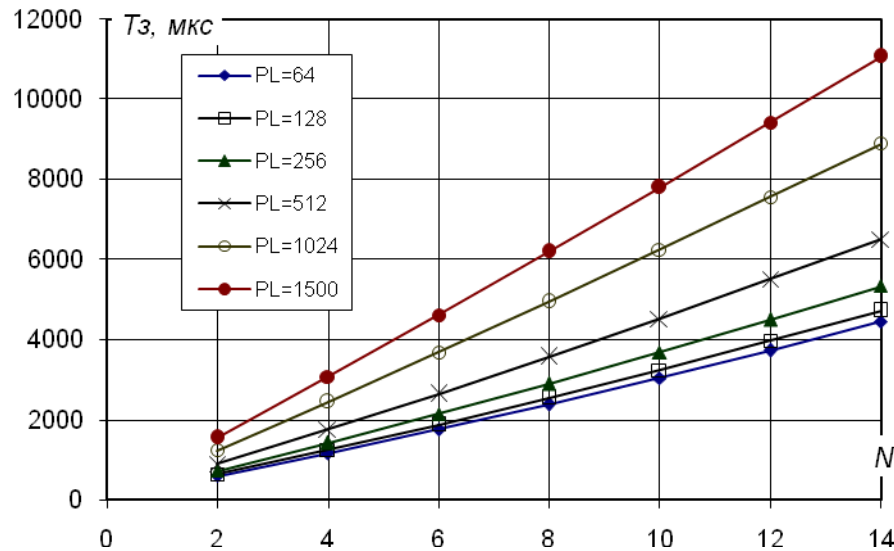


Рисунок 3.9 – Залежність усередненого часу затримки від кількості активних станцій з насиченим навантаженням в режимі RTS/CTS за системної швидкості 24 Мбіт/с (протокол UDP)

На рис.3.10-3.11 наведено графіки зміни середньої затримки для режиму RTS/CTS у разі застосування протоколу TCP.

Розрахункові величини мають такі значення: час успішного передавання пакету TCP з урахуванням  $ACK\_TCP$   $T_{PL} = 416$  мкс (PL = 64 байти), 892 мкс (PL = 1500 байтів).

Наведені на рис. 3.8 – 3.11 графіки визначають можливий діапазон зміни середньої затримки передавання пакетів даних з різним обсягом корисного навантаження для мереж, в яких кількість активних станцій змінюється від 2 до 14. Можна відзначити, що в мережі, в якій всі станції передають кадри даних однакової величини, середня затримка збільшується пропорційно збільшенню корисного навантаження, рис. 3.8 та рис. 3.10. Із збільшенням кількості активних станцій в мережі середня затримка збільшується теж майже лінійно, рис. 4.9 та

рис. 3.11.

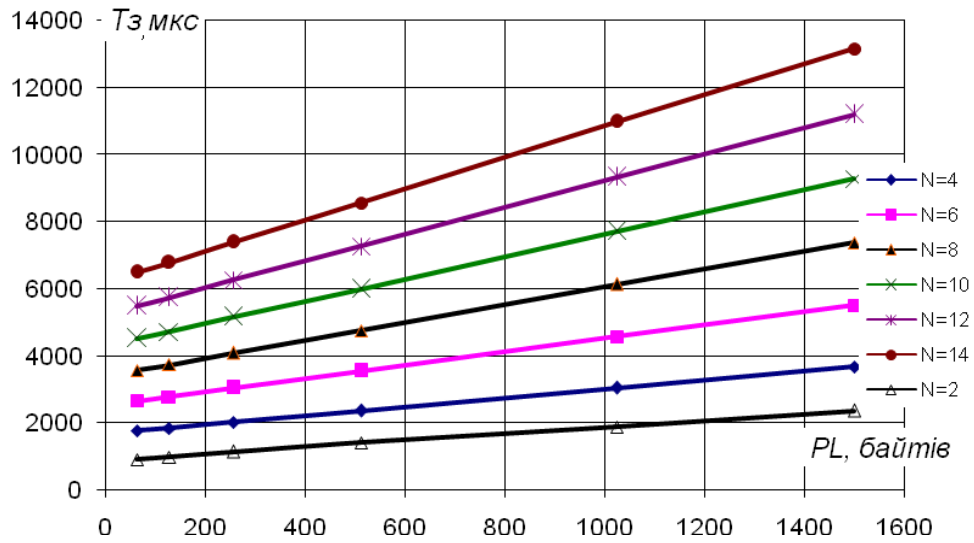


Рисунок 3.10 – Залежність усередненого часу затримки від величини корисного навантаження в кадрі  $PL$  за системної швидкості 24 Мбіт/с (протокол TCP)

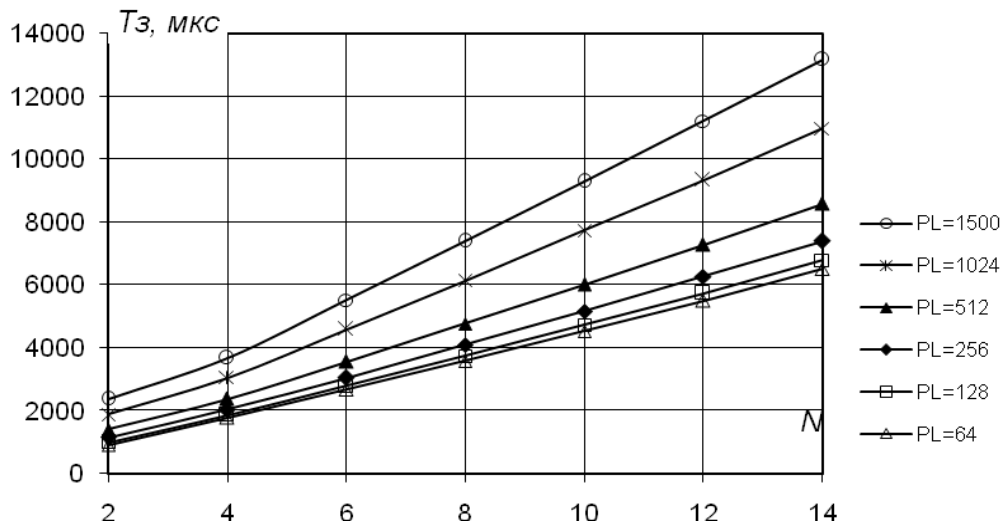


Рисунок 3.11 – Залежність усередненого часу затримки від кількості активних станцій з насиченим навантаженням  $N$  в режимі RTS/CTS за системної швидкості 24 Мбіт/с (протокол TCP)

Мінімальне значення середньої затримки в мережі з двома активними станціями становить 602 мкс для кадрів з корисним навантаженням 64 байти (протокол UDP) і 910 мкс (протокол TCP). Для кадрів з корисним навантаженням

1500 байтів затримка становить 1554 мкс та 2368 мкс відповідно.

Величина середньої затримки в мережі з чотирнадцятьма активними станціями у разі корисного навантаження в кожному кадрі 64 байти становить 4451 мкс (протокол UDP) і 6500 мкс (протокол TCP), а в разі корисного навантаження 1500 байтів – 11057 (протокол UDP) й 13164 мкс (протокол TCP).

У разі великої кількості активних станцій (чотирнадцяти) з насиченим навантаженням збільшення середньої затримки передавання у випадку застосування протоколу TCP порівняно з випадком застосування протоколу UDP становить 46% для кадрів з малим корисним навантаженням (64 байти в кадрі) і 16% для кадрів з великим корисним навантаженням (1500 байтів у кадрі). Якщо в мережі тільки дві активні станції, тоді збільшення середньої затримки в разі застосування протоколу TCP практично не залежить від величини корисного навантаження і становить 51% для кадрів з малим корисним навантаженням (64 байти) і 52% для кадрів з великим корисним навантаженням (1500 байтів).

**3.1.3.2. Нерівномірність затримки передавання кадрів даних.** Для визначення джитера  $\sigma^{(\tau)}$  скористаємось співвідношеннями (2.14) (2.16):

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

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

де  $N^{(b)}$  – загальна кількість переданих кадрів даних під час реалізації віртуального конкурентного вікна;  $\tau_j^*$  – максимальна затримка в разі успішного передавання кадру даних під час  $j$ -ої спроби доступу до безпроводового каналу.

Значення нерівномірності затримки залежно від кількості станцій у разі застосування протоколу UDP та TCP і двох значень корисного навантаження (64 та 1500 байтів) наведено в табл.3.1.

Таблиця 3.1 – Розрахункові значення нерівномірності затримки передавання кадру в мережі IEEE 802.11a з системною швидкістю 24 Мбіт/с

Кількість станцій N	2	4	6	8	10	12	14
Нерівномірність затримки ( $\sigma$ ), мкс							
Протокол UDP							
PL=64 байти	1951	5357	11704	20253	29542	38124	46033
PL=1500 байтів	4428	12642	27898	48086	69488	88629	105648
Протокол TCP							
PL=64 байти	2439	6929	15723	26578	38660	49670	59662
PL=1500 байтів	4061	14219	31536	54415	78608	100170	119255

Результати розрахунку нерівномірності затримки передавання кадру даних в мережі з насиченим навантаженням, що функціонує в режимі *RTS/CTS*, для випадку, коли всі станції передають кадри даних з однаковим корисним навантаженням  $PL = 64, 256, 512, 1024$  або  $1500$  байтів, наведено на рис.3.12. Протокол транспортного рівня *UDP*.

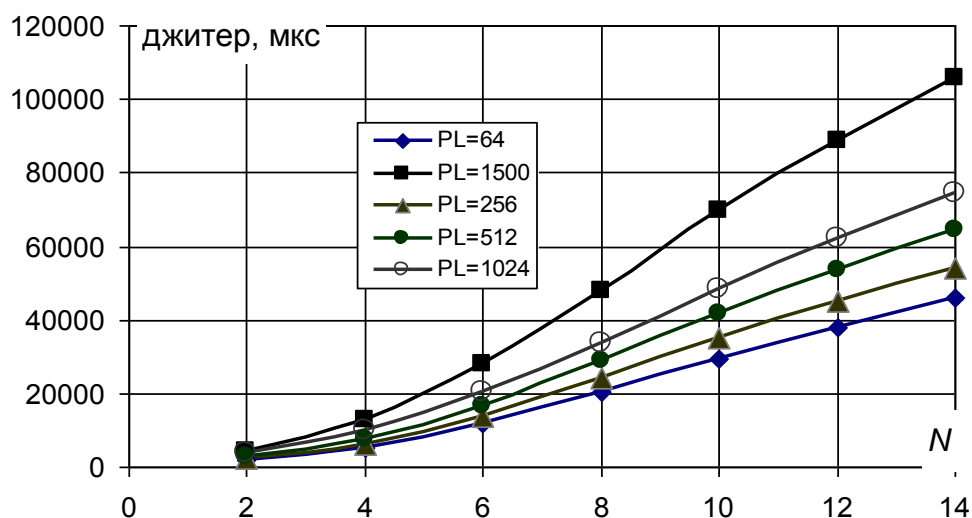


Рисунок 3.12 – Залежність нерівномірності затримки від кількості активних станцій в насиченій мережі для випадків  $PL = 64$  байти та  $PL = 1500$  байти в режимі *RTS/CTS* транспортний протокол *UDP*

Із графіка, наведеного на рис. 3.12, випливає, що збільшення нерівномірності затримки із збільшенням кількості активних станцій від 2 до 8 має нелінійний характер, а потім змінюється майже лінійно.

У разі, коли корисне навантаження одного кадру становить  $PL = 64$  байти нерівномірність затримки змінюється від 1951 мкс (дві станції в мережі) до 46033 мкс (чотирнадцять станцій). Тобто в середньому поява однієї додаткової станції з насиченим навантаженням збільшує нерівномірність затримки на 3673 мкс. Якщо корисне навантаження  $PL = 1500$  байтів, нерівномірність затримки змінюється від 4428 мкс (дві станції в мережі) до 105648 мкс (чотирнадцять станцій). У такому разі зі збільшенням кількості станцій на одну нерівномірність затримки зростає в середньому на 8435 мкс.

На рис. 3.13 наведено графік залежності нерівномірності середньої затримки від кількості станцій з насиченим навантаженням у разі застосування транспортного протоколу TCP.

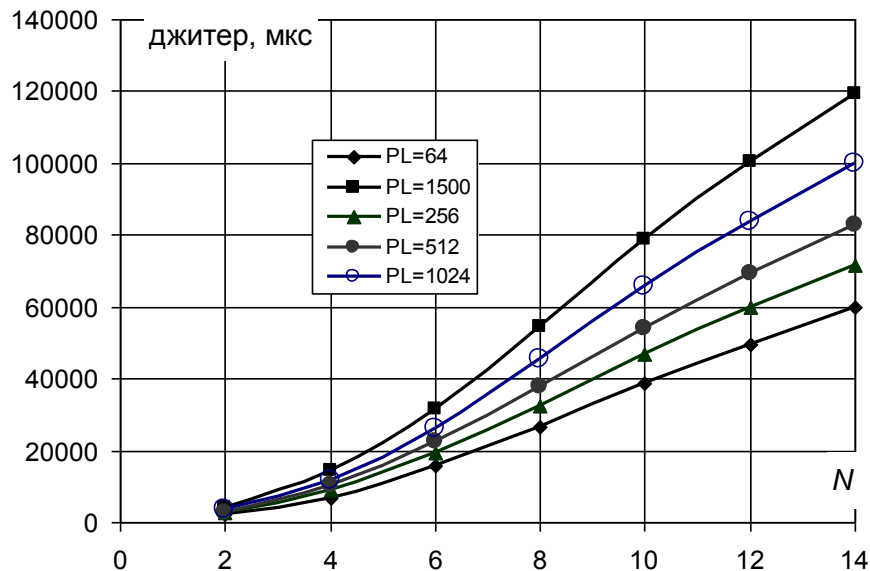


Рисунок 3.13 – Залежність нерівномірності затримки від кількості активних станцій в насиченій мережі для випадків  $PL = 64$  байти та  $PL = 1500$  байти в режимі RTS/CTS транспортний протокол TCP

Якщо корисне навантаження одного кадру  $PL = 64$  байтів нерівномірність затримки у разі застосування протоколу TCP змінюється від 2439 мкс (дві станції в мережі) до 59663 мкс (чотирнадцять станцій). Зі зміною кількості станцій на дванадцять (від 2 до 14) нерівномірність зростає в 24,5 рази, в середньому на 4767 мкс на кожну додаткову станцію в мережі. Якщо корисне навантаження  $PL = 1500$  байтів, тоді нерівномірність затримки змінюється від 4061 мкс (дві

станції в мережі) до 119255 мкс (чотирнадцять станцій). Зі зміною кількості станцій від двох до чотирнадцяти нерівномірність затримки збільшується в 29,4 рази в середньому на 9600 мкс на одну станцію.

У разі використання транспортного протоколу TCP нерівномірність затримки більше порівняно з випадком використання протоколу UDP на 29,6% (2 станції з насиченим навантаженням, PL = 1500 байтів) і на 12,9% (14 станцій, PL = 1500 байтів).

Графіки, наведені на рис.3.8-3.13, дозволяють отримати кількісні оцінки щодо особливостей застосування транспортних протоколів TCP та UDP для передавання пакетів даних засобами безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11.

**Значення ймовірності втрати пакета  $P^{(rs)}$**  можна визначити за співвідношенням (2.25), як величину доповняльну до ймовірності успішного передавання пакету даних:

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

Ймовірність втрати пакета під час передавання у безпроводовій мережі IEEE 802.11a з обмеженою кількістю повторних спроб ( $R=6$ ) можна оцінити з використанням графіка залежності (2.25), наведеного на рис.3.12.

Із графіка, наведеного на рис.3.12, випливає, що ймовірність втрати кадру даних у безпроводовій мережі з насиченим навантаженням внаслідок великої кількості колізій є доволі невеликою і не перевищує  $10^{-2}$  навіть за умови, що в конкуренції за канал одночасно беруть участь 14 станцій ( $CW_{\min} = 15$ ). Слід зазначити, що режим насиченого навантаження в реальних мережах виникає, наприклад, тоді, коли кілька абонентів одночасно здійснюють «закачування» великих файлів або передають/приймають відеопотоки в реальному часі (здійснення відео репортажу або перегляд кінофільму).

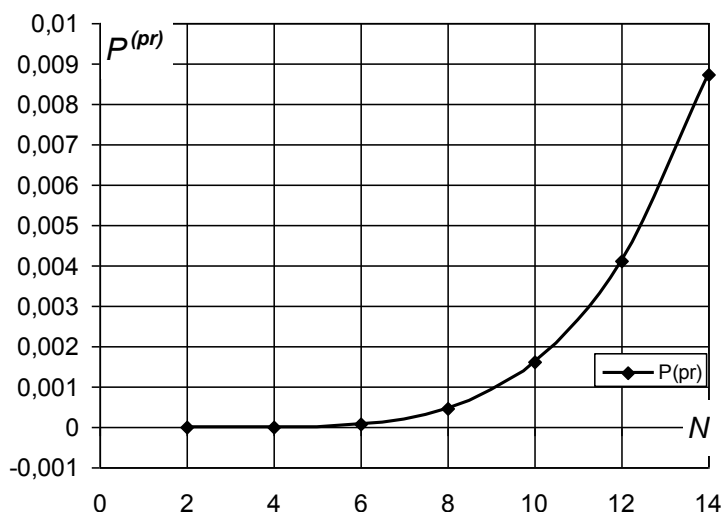


Рисунок 3.12 – Графік залежності ймовірності втрати кадру даних в насиченій мережі з урахуванням можливих повторних спроб ( $R=6$ ) з кількістю активних станцій  $N^*$

Якщо абоненти мережі використовують безпроводову мережу для передавання голосового трафіка, то можна очікувати, що весь цей трафік буде якісно сприйнятий на приймальній стороні, навіть якщо всі 14 станцій здійснюють передавання голосового трафіка. Там, де трафік є нечутливим до затримок, загальну кількість спроб передавання збільшують.

### 3.3 Дослідження експлуатаційних характеристик безпроводових мереж специфікацій IEEE 802.11n

#### 3.3.1. Оцінювання реальної швидкості передавання інформації у безпроводовій мережі стандарту IEEE 802.11n

Оцінимо швидкість передавання інформації в мережі, в разі використання одного просторового каналу [59].

Наведені в табл.1.2 швидкості характеризують процес передавання блоку даних, що міститься безпосередньо в кадрі фізичного рівня. Під час обчислення цих швидкостей не враховано додаткові витрати часу, що мають місце у процесі обміну кадрами даних (преамбула кадру, міжкадрові інтервали, кадр підтвердження успішного приймання – АСК).

Визначимо максимальну пропускну здатність каналу мережі IEEE 802.11n, що має місце за ідеальних умов, у разі передавання одного кадру даних. Під час розрахунку не враховуємо вплив навколишнього середовища, час очікування, обумовлений лічильником зворотного відліку, та втрати часу через колізії, що можуть мати місце під час конкуренції кількох станцій за доступ до каналу. Пропускна здатність визначимо із застосуванням співвідношення:

$$S_{\max\_1} = \frac{PL}{T_{acc}}, \quad (3.2)$$

де  $PL$  – обсяг корисного навантаження одного кадру даних,

$T_{acc}$  – час доступу до каналу для передавання одного кадру даних.

Розрахунок зробимо для змішаного режиму для діапазону 5 ГГц. У цьому режимі в мережі можуть одночасно функціонувати станції IEEE 802.11a та IEEE 802.11n. Преамбула кадру даних містить преамбулу спадкового режиму (20 мкс) та преамбулу режиму швидкісного передавання (HT), рис. 3.13 [18].



Рисунок 3.13 – Структура преамбули кадру фізичного рівня згідно зі специфікацією IEEE 802.11n у змішаному режимі

Поля преамбули HT-LTF (довге навчальне поле) передають для кожної антени точки доступу, тобто, у разі наявності у точки доступу двох антен, у преамбулі буде два таких поля, а тривалість преамбули HT режиму становитиме 28 мкс. У разі однієї антени тривалість преамбули HT – 20 мкс.

Для розрахунку використано стандартні значення часових інтервалів: SIFS = 16 мкс (діапазон 5 ГГц) – короткий міжкадровий інтервал, DIFS = SIFS + 2σ = 16+18 = 34 мкс – міжкадровий інтервал розподіленої функції координації, σ = 9 мкс – часовий слот очікування, RTS = 20 + 26 = 46 мкс, CTS = 20 + 18 = 38 мкс,



$ACK = 20 + 24 = 44$  мкс – кадр підтвердження успішного приймання кадру даних. Тривалість символу OFDM становить 3,6 мкс (захисний інтервал 0,4 мкс) Тривалість інтервалу, протягом якого здійснюють безпосередньо передавання блоку даних, визначимо окремо для конкретного значення навантаження (PL).

Зробимо розрахунок для навантаження обсягом 64 байти, 1500 байтів та агрегованого пакета 4095 байтів, за умови використання схеми модуляції й кодування MCS7 табл.1.2 із використанням частотного каналу 20 МГц.

У цьому режимі для передавання кодованих даних передбачено 52 носійні коливання OFDM символу, тривалість захисного інтервалу 0,4 мкс або 0,8 мкс, тривалість корисного інтервалу 3,2 мкс. Швидкість завадостійкого коду 5/6, спосіб модуляції носійних – QAM-64 (6 бітів кодової інформації на символ).

Визначимо час передавання кадру з корисним навантаженням  $PL = 64$  байти. Крім безпосередньо даних, кадр містить преамбулу, заголовки протоколів різного рівня та контрольну суму. В разі застосування для передавання пакета, що надійшов на точку доступу, протоколів UDP/IP, а також контрольної суми (FCS) 4 байти додатковий обсяг інформації складе 32 байти. Сумарне навантаження кадру становитиме  $64+32 = 96$  байтів. Кількість кодованих бітів, які треба передати, становить  $PL=96 \times 8 \times 6/5 = 922$ . Кількість OFDM символів, які потрібні для передавання такої кількості інформації становить  $m = 922/6/52 = 3,63 \rightarrow 3$  символи. Час передавання трьох символів становить  $T_{sym} = (0,4+3,2) \times 3 = 10,8$  (мкс). З урахуванням преамбули (40 мкс) час передавання кадру становитиме  $40+10,8 = 50,8$  мкс.

Час доступу до каналу  $T_{acc}$  для передавання одного кадру даних з навантаженням  $PL = 64$  байтів становить:

$$\begin{aligned} T_{acc} &= \bar{T}_{PL} = DIFS + T_{RST} + SIFS + T_{CST} + SIFS + T_{MPDU} + SIFS + T_{ACK} = \\ &= 34+46+16+38+16+50,8+16+40 = 256,8 \text{ (мкс)}. \end{aligned}$$

Пропускна здатність безпроводового каналу з одним просторовим потоком, у разі передавання пакета аудіовізуальних даних з корисним навантаженням  $PL=64$  байти (512 бітів), становитиме  $S_{\max\_1} = 512 \text{ (бітів)} / 256,8 \text{ (мкс)} = 1,993$  Мбіт/с.

У разі передавання кадру даних з корисним навантаженням 1500 байтів (14708 кодованих бітів, 48 OFDM символів), за тих самих умов швидкість передавання аудіовізуальної інформації становить  $S_{\max\_1} = 31,679$  Мбіт/с. Якщо корисне навантаження агрегованого пакета становить 4095 байтів (39312 кодованих бітів, 128 OFDM символів), тоді  $S_{\max\_1} = 49,397$  Мбіт/с.

Із отриманих результатів можна зробити висновок, що навіть за ідеальних умов, пропускна здатність каналу мережі IEEE 802.11n дуже залежить від величини корисного навантаження, що міститься в пакеті даних.

Для режиму, для якого здійснено розрахунки (один просторовий канал, ширина частотної смуги  $\Delta f = 20$  МГц), швидкість передавання даних у межах кадру фізичного рівня становить 72,2 Мбіт/с, табл. 1.2, але розрахована для ідеальних умов швидкість передавання корисної інформації безпроводовим каналом становить 1,88 Мбіт/с (PL = 64 байти), або 31,679 Мбіт/с (PL = 1500 байтів), або 49,397 Мбіт/с (PL = 4095 байтів).

Реальна швидкість передавання в мережі, в якій одночасно за доступ до каналу конкурують кілька (або багато) станцій, буде ще меншою, оскільки в наведеному розрахунку не враховано час очікування доступу до каналу, обумовлений лічильником випадкової затримки, та втрати часу, обумовлені колізіями, які можуть виникати під час спроби передати кадри RTS.

Для оцінювання реальної пропускної здатності каналу мережі IEEE 802.11n, з урахуванням впливу колізій, зробимо розрахунки експлуатаційних параметрів мережі із застосуванням концепції віртуального конкурентного вікна [56].

Нижче наведено результати розрахунку пропускної здатності та інших експлуатаційних параметрів безпроводової мережі, що функціонує за специфікацією IEEE 802.11n у змішаному режимі з одним просторовим каналом.

Для розрахунку використано формули, наведені у табл. 3.1, та значення ймовірнісних характеристик наведених в табл. 2.1.

На рис.3.14 наведено графік залежності (суцільна лінія) максимальної пропускної здатності  $S$  мережі за специфікацією IEEE 802.11n, за ідеальних умов (без урахування взаємного впливу активних станцій та зовнішнього середовища),

від величини корисного навантаження PL в кадрі фізичного рівня. Умови відповідають режиму з однією активною станцією в мережі. У розрахунку враховано максимальну швидкість передавання даних 72,2 Мбіт/с. Для порівняння наведено також графік залежності пропускної здатності (пунктирна лінія) мережі за специфікацією IEEE 802.11a, яка функціонує з максимальною швидкістю передавання даних  $S = 54$  Мбіт/с.

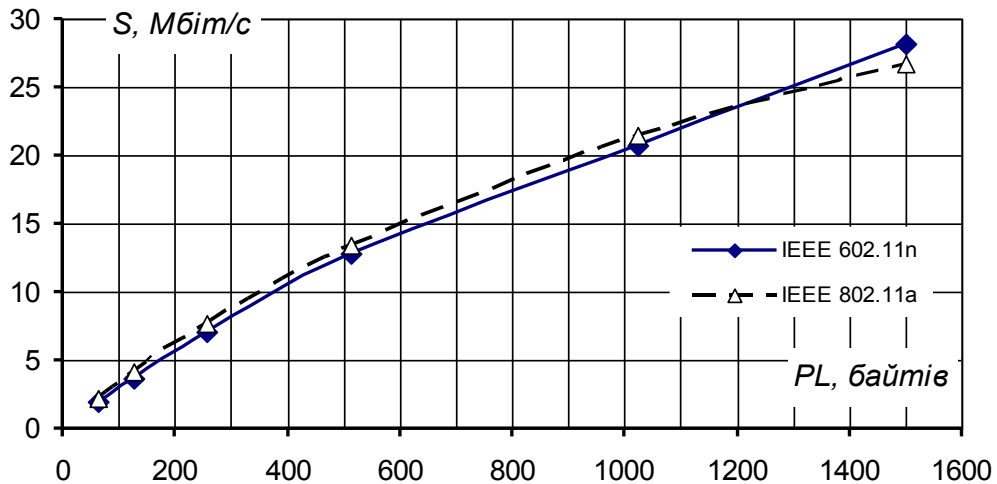


Рисунок 3.14 – Залежність максимальної розрахункової пропускної здатності  $S$  мережі IEEE 802.11n з одним просторовим каналом від величини корисного навантаження  $PL$

На рис.3.15 наведено графіки залежності пропускної здатності безпроводової мережі IEEE 802.11n від кількості активних станцій в мережі з урахуванням колізій та часу очікування, обумовленого лічильниками зворотного відліку станцій.

Розрахунок з використанням співвідношень (1.20) та (1.22) зроблено для трьох величин корисного навантаження: 64, 512 та 1500 байтів.

Пунктирними лініями наведено рівень максимальної розрахункової пропускної здатності, рис. 3.14, безпроводової мережі IEEE 802.11n у разі передавання кадрів з однаковим корисним навантаженням. Суцільними лініями наведено розрахункову пропускну здатність з урахуванням колізій та інтервалів очікування. Із наведених графіків випливає, що зменшення інтегральної пропускної здатності через виникнення колізій в мережі IEEE 802.11n з різною

кількістю активних станцій (від двох до чотирнадцяти) є незначним. Пропускна здатність безпроводового каналу в разі застосування системної швидкості 72,2 Мбіт/с змінюється від 25,16 Мбіт/с (чотирнадцять активних станцій) до 26,3 Мбіт/с (шість активних станцій}

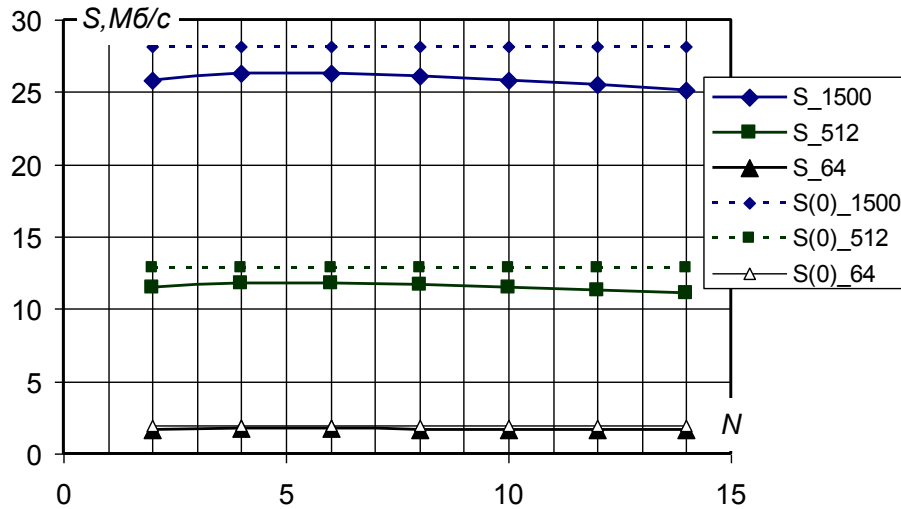


Рисунок 3.15 – Залежність пропускної здатності  $S$  мережі IEEE 802.11n від кількості активних станцій  $N$

Графіки залежності пропускної здатності, що припадає на одну активну станцію безпроводової мережі з насиченим навантаженням, від кількості активних станцій  $N$  наведено на рис. 3.16.

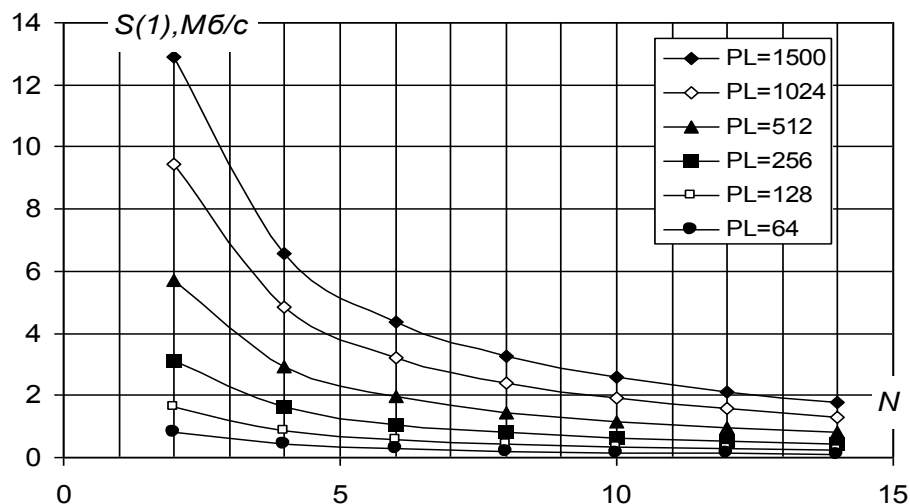


Рисунок 3.16 – Залежність пропускної здатності  $S(1)$ , що припадає на одну активну станцію, від кількості активних станцій  $N$  в мережі IEEE 802.11n з одним просторовим каналом

У разі обсягу корисного навантаження в кожному переданому кадрі  $PL = 64$  байти пропускна здатність каналу, що припадає на одну станцію змінюється від 0,833 Мбіт/с (дві активні станції) до 0,212 (вісім станцій) і до 0,115 (чотирнадцять станцій). Якщо корисне навантаження кожного кадру становить 1500 байтів, тоді пропускна здатність каналу для кожної активної станції становить 12,89 Мбіт/с (дві активні станції), 3,26 Мбіт/с (вісім станцій) 1,8 Мбіт/с (чотирнадцять станцій).

### 3.3.2 Оцінювання параметрів якості обслуговування безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11n

Середній час затримки передавання кадру даних у безпроводовій мережі IEEE 802.11n з насиченим навантаженням дорівнює часу реалізації віртуального конкурентного вікна  $T_{VCW}$ . Цей час визначено за співвідношенням (2.13). Графік залежності середньої затримки  $T_3$  від кількості активних станцій у мережі IEEE 802.11n з  $N$  активними станціями наведено на рис.3.17.

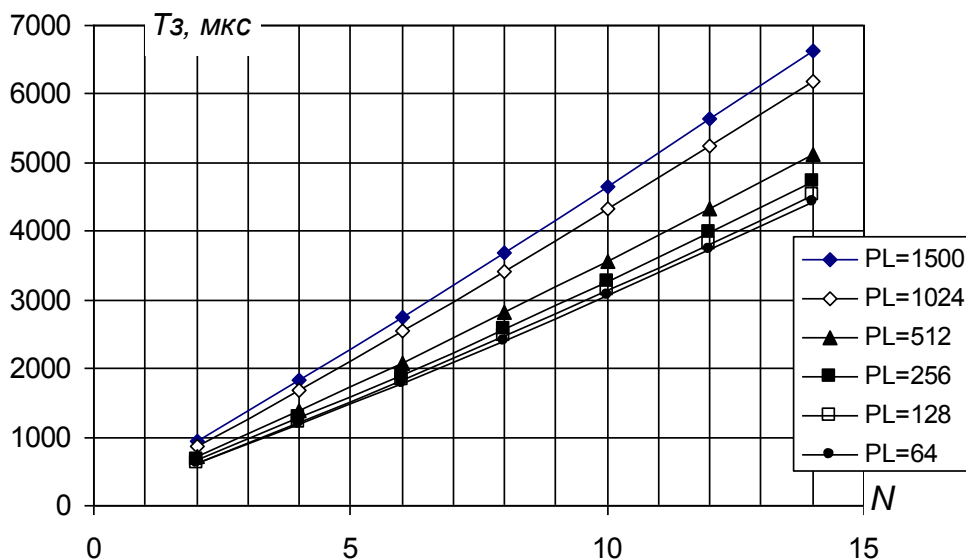


Рисунок 3.17 – Залежність середньої затримки передавання кадрів  $T_3$  від кількості активних станцій  $N$  в мережі IEEE 802.11n

Середня затримка часу передавання кадру, як і у випадку специфікації

IEEE 802.11a збільшується лінійно зі збільшення кількості активних станцій в мережі. У разі корисного навантаження  $PL = 1500$  байтів у кадрі даних середня затримка змінюється від 931 мкс (дві активні станції) до 6632 мкс (чотирнадцять активних станцій). У разі корисного навантаження  $PL = 64$  байти середня затримка змінюється від 614 мкс (дві активні станції) до 4429 мкс (чотирнадцять активних станцій).

Оцінювання нерівномірності часу затримки здійснюємо із застосуванням співвідношень (3.14) та (3.16). Результати розрахунків наведено в табл.3.2 та на рис. 3.18. Для оцінювання меж зміни нерівномірності затримки наведено результати розрахунків для двох значень корисного навантаження в кадрах передавання даних:  $PL = 64$  байти,  $PL = 1500$  байтів.

Таблиця 3.2 – Значення нерівномірності ( $\sigma$ ) середньої затримки передавання кадру в одноканальній мережі 802.11n

Кількість активних станцій, N	2	4	6	8	10	12	14
$\sigma$ , мкс (PL=64 байтів)	1447,4	4363,2	9895,5	17422,5	25541,3	33311,6	40431,3
$\sigma$ , мкс (PL=1500 байтів)	2203,6	6716,7	15206,4	26626,9	38759,9	50159,0	60391,9

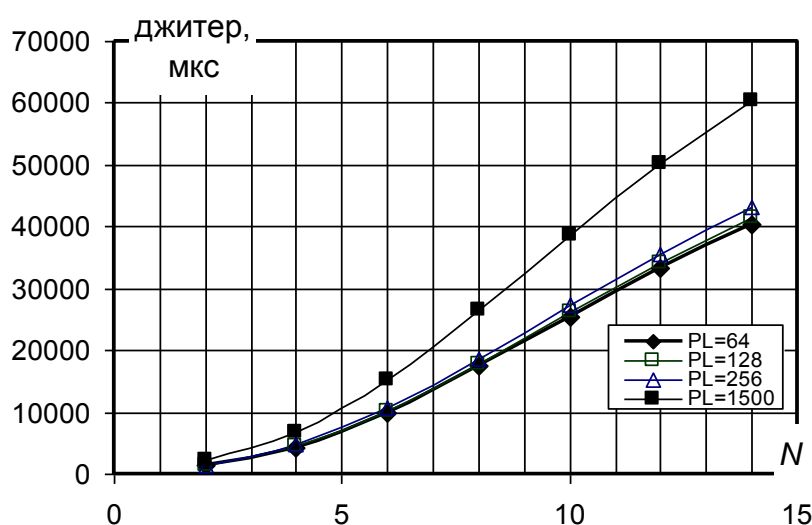


Рисунок 3.18 – Залежність нерівномірності затримки передавання кадрів (джитера) від кількості активних станцій N в мережі IEEE 802.11n

Як і у випадку мереж за специфікацією IEEE 802.11a нерівномірність затримки збільшується нелінійно в разі збільшення кількості активних станцій від двох до восьми. Подальше збільшення кількості активних станцій (від восьми до чотирнадцяти) призводить до лінійного збільшення нерівномірності затримки.

Мінімальні та максимальні значення джитера, рис.3.18, такі: у разі корисного навантаження кожного кадру мережі  $PL = 64$  байти,  $\sigma_{\min}^{(\tau)}(64) = 1447,4$  мкс (дві активні станції),  $\sigma_{\max}^{(\tau)}(64) = 40431,3$  мкс (чотирнадцять активних станцій), а в разі корисного навантаження  $PL = 1500$  байтів,  $\sigma_{\min}^{(\tau)}(1500) = 2203,6$  мкс (дві активні станції),  $\sigma_{\max}^{(\tau)}(1500) = 60391,9$  мкс (чотирнадцять активних станцій) [59].

### Висновки до розділу 3

1. Пропускна здатність безпроводового каналу за сприятливих умов (без урахуванням завад та перешкод) залежить від обсягів корисного навантаження в кожному кадрі даних та типу транспортного протоколу. У разі використання транспортного протоколу UDP прогнозована пропускна здатність каналу за наявності тільки однієї станції з насиченим навантаженням буде на 70% більше ніж у разі використання протоколу TCP для малих кадрів (корисне навантаження 64 байта) і на 20% – для великих (корисне навантаження 1500 байт).

2. Пропускна здатність одного просторового каналу безпроводової мережі за специфікацією IEEE 802.11n набагато менше швидкості передавання даних в межах кадру фізичного рівня, що обумовлено колізіями, інтервалами очікування та непродуктивними витратами часу, пов'язаними з передаванням заголовків мережних протоколів різних рівнів та службовою інформацією безпроводової мережі.

3. У мережах IEEE 802.11a/n за наявності кількох активних станцій з насиченим навантаженням (передавання або приймання відео в реальному часі) пропускна здатність каналу для кожної станції в режимі з одним просторовим каналом не перевищує 13 Мбіт/с в разі наявності двох таких станцій і 6,5 Мбіт/с у

разі наявності чотирьох станцій.

4. У разі передавання кадрів з великим корисним навантаженням (1500 байтів і більше) нерівномірність затримки передавання швидко зростає зі збільшенням кількості станцій і змінюється від 2,2 мс (дві активні станції) до 60,4 мс (14 активних станцій) в разі передавання великого корисного навантаження (1500 байтів), що може обмежити можливість передавати потокову інформацію в мережах з кількома активними станціями.

5. Використання одного просторового каналу безпроводової мережі IEEE 802.11n у змішаному режимі може забезпечити одночасно до 14 голосових з'єднань з високою якістю надання послуги, оскільки значення якісних показників мережі задовольняють вимоги щодо передавання звукового трафіка (частка пропускної здатності, що припадає на одну станцію, середня затримка та нерівномірність передавання).

6. За ідеальних умов, один просторовий канал безпроводової мережі IEEE 802.11n у змішаному режимі може забезпечити одночасне передавання до трьох відеопотоків інтенсивністю 4-5 Мб/с.

7. Найбільш імовірним сценарієм передавання аудіовізуальної інформації в мережі IEEE 802.11 є сценарій з використанням одного просторового каналу, що обумовлено наявністю лише однієї антени у абонентських пристроїв.



## **4 ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ АУДІОВІЗУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЗАСОБАМИ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ IEEE 802.11**

У даному розділі проаналізовано ефективність застосування безпроводової мережі IEEE 802.11 для передавання аудіовізуального контенту.

Згідно із загальноприйнятим значенням поняття ефективності будемо розглядати ефективність як показник успішності функціонування системи для досягнення установлених цілей [55]. Тобто, оцінимо на скільки і за яких умов засоби безпроводової мережі 802.11 можуть забезпечити прийнятну якість надання послуг, пов'язаних з передаванням аудіовізуального контенту. Для отримання зазначених оцінок проаналізовано характеристики аудіовізуальних інформаційних потоків, які передають засобами безпроводових мереж, зроблено порівняння експлуатаційних характеристик безпроводових мереж IEEE 802.11 та параметрів аудіовізуальних потоків, здійснено визначення експлуатаційних параметрів шляхом натурних випробувань безпроводових мереж в насиченому режимі з різною кількістю активних станцій.

Для оцінювання ефективності використання технологічних можливостей безпроводової мережі запропоновано метод оцінювання із застосуванням коефіцієнта корисного навантаження

### **4.1 Характеристики аудіовізуальних інформаційних потоків**

Щоб оцінити ефективність застосування мережі 802.11n для передавання аудіовізуальної інформації треба з'ясувати, які характеристики процесу передавання є найбільш критичними для якісного забезпечення відповідних інформаційних послуг. Згідно з рекомендацією ITU-TY1541 найбільш впливовими характеристиками є середня затримка, нерівномірність (джитер) часу передавання та ймовірність втрати пакету.

Проаналізуємо, які розміри мають пакети даних, що передають звукову та

відео інформацію.

Характеристики потоків даних сформованих найбільш поширеними звуковими кодеками наведено в табл.1 [60-63].

Розглянемо окремо характеристики інформаційного потоку одного з найбільш популярних кодеків G 711. Цей кодек генерує 50 пакетів за секунду (періодичність генерування пакетів 20 мс), кожен пакет містить 160 байтів корисного навантаження, загальна величина одного пакета з урахуванням заголовків протоколів різних рівнів IP мережі становить 218 байтів, що обумовлює інтенсивність інформаційного потоку 87,2 кбіт/с.

Таблиця 4.1 – Характеристики потоків даних, сформованих звуковими кодеками

Характеристики звукового кодека				Розрахунок інтенсивності інформаційного потоку			
Кодек та бітова швидкість (кбіт/с)	Розмір вибірки кодека (байтів)	Інтервал вибірки кодека (мс)	Усереднена суб'єктивна оцінка (MOS <sup>1</sup> )	Розмір голосових даних (байтів)	Тривалість голосових даних (мс)	Кількість пакетів за секунду (PPS <sup>2</sup> )	Пропускна здатність Ethernet (кбіт/с)
G 711 (64 кбіт/с)	80	10	4.1	160	20	50	87.2
G 729 (8 кбіт/с)	10	10	3.92	20	20	50	31.2
G 723.1 (6.3 кбіт/с)	24	30	3.9	24	30	33.3	21.9
G 723.1 (5.3 кбіт/с)	20	30	3.8	20	30	33.3	20.8
G.726 (32 кбіт/с)	20	5	3.85	80	20	50	55.2
G.726 (24 кбіт/с)	15	5		60	20	50	47.2
G 728 (16 кбіт/с)	10	5	3.61	60	30	33.3	31.5
G722_64k (64 кбіт/с)	80	10	4.13	160	20	50	87.2
ilbc_mode_20 (15.2 кбіт/с)	38	20	NA	38	20	50	38.4
ilbc_mode_30 (13.33 кбіт/с)	50	30	NA	50	30	33.3	28.8

Примітка: <sup>1</sup> – Mean Opinion Score (MOS) – усереднена суб'єктивна оцінка;

<sup>2</sup> – Packets Per Second (PPS).

Розглянемо тепер характеристики відеопотоку. Найбільшого поширення для передавання відео в IP мережах набула технологія, за якої блоки компресованого відео та звуку передають у форматі транспортного потоку MPEG2 TS [64-67]. У

такому разі кілька пакетів транспортного потоку MPEG2 TS вставляють (інкапсулюють) в IP пакет. На рис.4.1 наведено структуру такого пакета.



Рисунок 4.1 – Структура IP пакета відеопотоку в мережі Ethernet

У наведеній на рис.4.1 схемі спільний заголовок та контрольна сума додали до корисного навантаження 54 байти: Ethernet/IP/UDP/FCS – 22/20/8/4 (байтів). Сумарне корисне навантаження одного IP пакета для передавання відеоінформації в даному прикладі становить 1316 байтів (сім пакетів MPEG2 TS по 188 байтів). Один IP пакет переносить сім пакетів MPEG-2 TS. Це поширена пропорція. Збільшення числа MPEG пакетів в одному IP пакеті, з одного боку, призводить до більш ефективного використання транспортного ресурсу, але з іншого – збільшує джитер (нерівномірність надходження пакетів в точку призначення). Тому вибирають компромісний варіант [66]. Для послуги IP ТВ або перегляду відео із мережі YouTube зі стандартною роздільною здатністю необхідна швидкість відео потоку становить 4-5 Мб/с, а для перегляду відео у форматі високої роздільної здатності (FullHD) – 15 Мб/с [67].

Для оцінювання рівня параметрів відеопотоку розглянемо сценарій, за якого джерело генерує відео потік *SPTS* (Single Program Transport Stream – один програмний транспортний потік) з інтенсивністю 4 Мбіт/с (інтенсивність надходження корисного навантаження). У разі транспортування такого потоку користувачу мережею Ethernet величина одного пакета і обсяг корисного навантаження будуть такі, як наведено на рис. 4.1. З урахуванням обсягу додаткової інформації в IP пакеті, що надходить користувачу інтенсивність відео-потоку в мережі Ethernet становитиме 4,164 МГб/с. Швидкість передавання кадрів Ethernet має становити 379, 93 кадрів/с, а періодичність надходження за ідеальних умов – 0,00263 с. Тобто нерівномірність затримки часу передавання має не

перевищувати зазначеного періоду.

На підґрунті розглянутого приклада можна оцінити параметри потокового відео сформованого різними відеокодеками найбільш поширеного на тепер стандарту H.264.

Зокрема на сайті компанії Apple рекомендовано використовувати такі швидкості відеопотоків стиснених без втрат [67]:

– для кадру розміром 1920x1080 (FullHighDefinition), вибирати швидкість передавання даних 7000-8000 кбіт/с;

– для кадру розміром 1280x720 (широко використовуваний формат високої чіткості), вибирати швидкість передавання даних 5000-6000 кбіт/с;

– для кадру розміром 640x480 (стандартної чіткості), вибирати швидкість передавання даних 1000-2000 кбіт/с;

– для кадру розміром 320x240 (Інтернет-розмір), вибирати швидкість передавання даних 300-500 кбіт/с;

– для кадру розміром 176x144 (3G), вибирати швидкість передавання даних 50-60 кбіт/с 10-15 кадрів за секунду, або до 150-200 кбіт/с для 24-30 кадрів за секунду.

Величина корисного навантаження в кадрі фізичного рівня не перевищує приблизно 1400 байтів, що обумовлено повсюдним використанням технології Ethernet з обмеженням корисного навантаження в одному кадрі на рівні 1500 байтів. Оскільки навантаження кадру складається з блоків відеопотоку та відповідного йому аудіо потоку, а кожен блок має свої ідентифікатори та службову інформацію корисне навантаження не перевищує 1400 байтів. Цю величину корисного навантаження можна використати для оцінювання параметрів аудіовізуального потоку на рівні мережі передавання даних.

З урахуванням зазначеного можна приблизно визначити інтенсивність та періодичність передавання кадрів аудіовізуального потоку на каналному рівні для забезпечення якісного відтворення відповідного контенту в режимі реального часу. Результати оціночного розрахунку для кодеків H.264 наведено в табл.5.2.

Експериментальні дані щодо дослідження інтенсивності компресованих

аудіовізуальних потоків наведено в [68].

Крім зазначених вище параметрів треба брати до уваги вплив втрачених кадрів на якість відтворюваного аудіовізуального контенту. В найбільш поширених системах стиснення відеоконтенту відеопотік містить кадри трьох типів I (повний кадр), P (однобічно прогнозований кадр різницевих відліків), B (двобічно прогнозований).

Таблиця 4.2 – Характеристики пакетизованого аудіовізуального потоку

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

Втрата кадрів різного типу може призводити до різних спотворень відтворюваного зображення. До найбільших негативних наслідків призводить втрата опорного кадру I типу, що містить всю інформацію кадру початкового зображення. У нашому подальшому дослідженні ми вважаємо, що втрата будь-якого кадру призводить до однакових негативних наслідків, наприклад, до короткотермінового спотворення зображення (повне або часткове руйнування відтвореного кадру) або втрати синхронізації процесу декодування.

## **4.2 Оцінювання ефективності застосування безпроводових мереж IEEE 802.11 для передавання аудіовізуального контенту**

### **4.2.1 Характеристики голосового трафіка**

Для визначення умов, за яких безпроводова мережа у разі насиченого навантаження станцій може забезпечити прийнятну якість відтворення аудіовізуального контенту, проаналізуємо співвідношення експлуатаційних характеристик безпроводових мереж IEEE 802.11a/n та параметрів аудіовізуальних потоків.

У табл. 4.1 наведено параметри потоків даних, сформованих звуковими кодексами. Розглянемо параметри потоку, сформованого кодеком G 711: кількість пакетів за секунду (PPS) дорівнює 50, пропускна здатність мережі Ethernet

необхідна для передавання компресованого аудіопотоку (за умови рівномірного надходження пакетів) 87,2 кбіт/с, розмір корисного навантаження пакета 160 байтів, загальний обсяг пакету 218 байтів.

Періодичність надходження пакетів звукового потоку має складати 20 мс.

Проаналізуємо можливості безпроводових мереж, що функціонують за специфікацією IEEE 802.11a або IEEE 802.11n, щодо передавання тільки голосового трафіка абонентів мережі. У табл. 4.3 наведено пропускну здатність мережі IEEE 802.11a в режимі конкурентного доступу до каналу з урахуванням колізій за відсутності радіозавад у разі застосування системної швидкості  $S_0 = 24$  Мбіт/с.

Таблиця 4.3 – Пропускна здатність мережі IEEE 802.11a у разі  $S_0 = 24$  Мбіт/с

Кількість станцій, N	2	4	6	8	10	12	14
PL=128 байтів							
Пропускна здатність каналу, Мбіт/с	2,78	2,9	2,89	2,87	2,83	2,78	2,8
Пропускна здатність однієї станції, Мбіт/с	1,39	0,725	0,482	0,359	0,283	0,232	0,2
Середня затримка передавання, мс	0,6416	1,2445	1,8754	2,5371	3,2304	3,9537	4,7014
Нерівномірність затримки ( $\sigma$ ), мс	1,1651	3,3851	6,5922	10,8613	15,7080	20,4225	24,9822
PL=256 байтів							
Пропускна здатність каналу, Мбіт/с	4,97	5,15	5,15	5,10	5,04	4,97	4,99
Пропускна здатність однієї станції, Мбіт/с	2,485	1,29	0,858	0,638	0,504	0,414	0,356
Середня затримка передавання, мс	0,7296	1,4205	2,1394	2,8889	3,6697	4,4795	5,3120
Нерівномірність затримки ( $\sigma$ ), мс	1,3459	3,9790	8,0031	13,3642	19,3474	25,0480	30,4550
PL=1500 байтів							
Пропускна здатність каналу, Мбіт/с	14,57	14,82	14,82	14,75	14,67	14,56	14,6
Пропускна здатність однієї станції, Мбіт/с	7,285	3,705	2,47	1,844	1,467	1,213	1,043
Середня затримка передавання, мс	1,5536	3,0685	4,6112	6,1834	7,7831	9,4033	11,0297
Нерівномірність затримки ( $\sigma$ ), мс	3,3410	10,0498	21,7927	37,2794	53,7907	68,6544	81,9563

У табл. 4.4 наведено пропускну здатність мережі IEEE 802.11a в режимі конкурентного доступу до каналу з попереднім опитуванням (RTS/CTS) з

урахуванням колізій за відсутності радіозавад у разі застосування системної швидкості  $S_0 = 54$  Мбіт/с.

Порівняймо параметри звукового трафіка згенерованого кодеками G 711 та G 729 з експлуатаційними характеристиками безпроводової мережі IEEE 802.11a, що функціонує із системною швидкістю 24 Мбіт/с або 54 Мбіт/с.

Для нормального передавання і відтворення звуку згенерованого кодеком G 711 треба забезпечити пропускну здатність 75,2 кбіт/с (з урахуванням заголовків IP/UDP), та періодичність надходження пакетів 20 мс. А в разі застосування кодека G 729 – 19,2 кбіт/с та 20 мс відповідно.

Таблиця 4.4 – Пропускна здатність мережі IEEE 802.11a у разі  $S_0 = 54$  Мбіт/с

Кількість станцій, N	2	4	6	8	10	12	14
	PL=128 байтів						
Пропускна здатність каналу, Мбіт/с	3,50	3,73	3,72	3,68	3,61	3,54	3,47
Пропускна здатність однієї станції, Мбіт/с	1,75	0,933	0,62	0,46	0,361	0,295	0,248
Середня затримка передавання, мс	0,498	0,957	1,443	1,961	2,512	3,094	3,707
Нерівномірність затримки ( $\sigma$ ), мс	1,278	3,543	7,227	11,57	15,70	19,23	22,15
	PL=256 байтів						
Пропускна здатність каналу, Мбіт/с	6,72	6,95	6,94	6,86	6,75	6,63	6,50
Пропускна здатність однієї станції, Мбіт/с	3,36	1,738	1,157	0,858	0,675	0,563	0,464
Середня затримка передавання, мс	0,5376	1,037	1,563	2,121	2,711	3,334	3,984
Нерівномірність затримки ( $\sigma$ ), мс	1,382	3,841	7,828	12,51	16,95	20,72	23,82
	PL=1500 байтів						
Пропускна здатність каналу, Мбіт/с	24,55	25,08	25,05	24,87	24,62	24,34	24,04
Пропускна здатність однієї станції, Мбіт/с	12,275	6,27	4,125	3,109	2,462	2,028	1,717
Середня затримка передавання, мс	0,906	1,773	2,667	3,592	4,549	5,534	6,544
Нерівномірність затримки ( $\sigma$ ), мс	2,339	6,789	15,08	26,24	38,09	49,17	59,00

Зробимо оцінювання за умови, що мережу навантажено тільки голосовим трафіком. Як випливає із аналізу даних, наведених в табл. 4.3 та 4.4 необхідну пропускну здатність безпроводова мережа 802.11a може забезпечити для великої кількості користувачів (не менше 14 активних абонентів на одну точку доступу) як у разі застосування системної швидкості 24 Мбіт/с, так і у разі застосування

системної швидкості 54 Мбіт/с. Те саме стосується мережі 802.11 n, що функціонує в традиційному або змішаному режимі з одним просторовим каналом в частотній смузі 20 МГц в режимі із системною швидкістю 72 Мбіт/с.

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

У безпроводовій мережі IEEE 802.11n, що функціонує у змішаному режимі нерівномірність передавання пакетів має значно більшу величину порівняно з мережами IEEE 802.11a, табл.4.5.

Таблиця 4.5 – Пропускна здатність мережі IEEE 802.11n у разі  $S_0 = 72$  Мбіт/с

Кількість станцій, N	2	4	6	8	10	12	14
	PL=128 байтів						
Пропускна здатність каналу, Мбіт/с	3,50	3,73	3,72	3,68	3,61	3,54	3,47
Пропускна здатність однієї станції, Мбіт/с	1,75	0,933	0,62	0,46	0,361	0,295	0,248
Середня затримка передавання, мс	0,620	1,201	1,806	2,436	3,091	3,771	4,473
Нерівномірність затримки ( $\sigma$ ), мс	1,482	4,474	10,150	17,872	26,200	34,170	41,471
	PL=256 байтів						
Пропускна здатність каналу, Мбіт/с	6,72	6,95	6,94	6,86	6,75	6,63	6,50
Пропускна здатність однієї станції, Мбіт/с	3,36	1,738	1,157	0,858	0,675	0,563	0,464
Середня затримка передавання, мс	0,650	1,259	1,892	2,551	3,235	3,944	4,674
Нерівномірність затримки ( $\sigma$ ), мс	1,551	4,688	10,632	18,709	27,402	35,701	43,285
	PL=1500 байтів						
Пропускна здатність каналу, Мбіт/с	24,55	25,08	25,05	24,87	24,62	24,34	24,04
Пропускна здатність однієї станції, Мбіт/с	12,275	6,27	4,125	3,109	2,462	2,028	1,717
Середня затримка передавання, мс	0,923	1,806	2,713	3,644	4,601	5,579	6,576
Нерівномірність затримки ( $\sigma$ ), мс	2,203	6,716	15,206	26,626	38,759	50,158	60,391

Так, у разі системної швидкості 72 Мбіт/с за наявності десяти активних абонентів нерівномірність затримки перевищує період надходження голосових



пакетів. Незначне погіршення якості голосового зв'язку через накопичення затримки або значну затримку окремих пакетів можна очікувати в такій мережі уже за наявності десяти активних абонентів.

#### 4.2.2 Характеристики потокової відеоінформації

Характеристики пакетизованого відеопотоку наведено у табл. 4.2. Додаткова інформація щодо результатів експериментального дослідження характеристик аудіовізуального трафіка наведено в табл. 4.6 [61]

У таблиці наведено дані, отримані у разі передавання аудіовізуального контенту у режимі реального часу із застосуванням протоколів RTP, UDP (основні дані в табл.4.6), а також дані у разі передавання і відтворення контенту у файловому форматі із застосуванням протоколів TCP, SMB (дані наведено в дужках).

Таблиця 4.6 – Експериментальні значення інтенсивності аудіовізуального потоку

Тип файлу	DVD VOB, кодек MPEG 2 (640x480, 25 кадр/с)	файл DivX, кодек DX50 (640x480, 24 кадр/с)	PSP avc1, mp4, кодек H.264 (368x208, 30 кадр/с)
Середня інтенсивність потоку, Мбіт/с	5,2 (6,5)	1,5 (1,4)	1,3 (1,2)
Пікова інтенсивність потоку, Мбіт/с	8,7 (10,4)	7,2 (6,0)	2,9 (3,3)

Відеопотік PSPMP4 (PlaystationPortable) призначений для відтворення на портативних пристроях і може бути відтворений більшістю сучасних мультимедійних леєрів. Фільми відрізняються високою якістю відео і аудіо за мінімальної інтенсивності потоку даних. У PSP MP4 H.264 відеопотік кодують кодеком H.264 – якісним, але досить ресурсоємним.

Із наведених в табл. 5.6 даних випливає, що мультимедійний трафік характеризується значною нерівномірністю. Для оцінювання можливості безпосереднього відтворення аудіовізуального потоку, що надходить мережею, із

заданою якістю треба порівнювати експлуатаційні характеристики безпроводової мережі з піковою інтенсивністю аудіовізуального потоку.

Безпроводова мережа за специфікацією IEEE 802.11a у разі функціонування із системною швидкістю 24 Мбіт/с може забезпечити передавання та відтворення в реальному часі без спотворень не більше одного відеопотоку стандартної чіткості, стисненого за стандартом MPEG2, через обмеження реальної пропускної здатності безпроводового каналу. Така мережа може забезпечити передавання та відтворення двох потоків стандартної чіткості, стиснених за стандартом MPEG4 (DivX), або до чотирьох потоків пониженої роздільної здатності (PSP avc1).

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

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

#### **4.3 Експериментальні дослідження пропускної здатності безпроводової мережі IEEE 802.11n**

Експерименти здійснено в навчальному корпусі факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського на обладнанні безпроводової мережі кафедри звукотехніки та реєстрації інформації. Експерименти проведено протягом кількох днів у період після завершення основного навчального процесу згідно з розкладом занять [68].

В експериментах використано від двох до шести абонентських станцій, а

саме: використано 2 стаціонарних комп'ютери з Wi-Fi адаптерами стандарту IEEE802.11n та 4 ноутбуки, два з яких обладнані кожний двома вбудованими антенами і два – однією. Для з'ясування пропускної здатності мережі в насиченому режимі здійснювали передавання великих файлів від однієї станції мережі до іншої. Для цього на трьох станціях мережі створили мережні теки загального доступу. Робочий діапазон мережі 2,4 МГц.

Схему здійснення експериментів наведено на рис.4.1.

Пропускную здатність мережі оцінювали за часом передавання корисної інформації (файлів великого розміру: 120,851 МБ, 256,9 МБ, 836,567 МБ) від однієї станції до іншої. Наявне для експерименту обладнання дало змогу визначити швидкість передавання корисної інформації для режимів:

- 1) ширина смуги радіоканалу 20 МГц, один просторовий потік, швидкість з'єднання 72 Мбіт/с;
- 2) ширина смуги радіоканалу 20 МГц, два просторових канали, швидкість з'єднання 144 Мбіт/с;
- 3) ширина смуги радіоканалу 40 МГц, один просторовий канал, швидкість з'єднання 150 Мбіт/с.

Для експерименту підготовлено файли archive.zip розміром 120,851 МБ, файл concert\_1.mp4 (256,9 МБ) та файл concert\_2.mp4 (836,567 МБ).



Рисунок 4.1 – Схема експериментальної безпроводової мережі IEEE802.11n

Під час перевірки пропускної здатності мережі, за умови наявності двох

насичених станцій, здійснювали передавання файлів різної величини між двома станціями безпроводової мережі у різних комбінаціях. Під час такого передавання канал розподіляється між двома процесами – передавання від джерела інформації до точки доступу і передавання від точки доступу до адресата. Обидва процеси безперервно передають кадри даних з однаковою інтенсивністю.

Час передавання певного із зазначених вище кадрів в кожному окремому експерименті відрізнявся. Так, під час десяти актів передавання файлу concert\_1.mp4 (256,9 МБ) за наявності двох активних станцій в режимі з'єднання зі швидкістю 150 Мбіт/с (один просторовий канал, ширина частотної смуги 40 МГц), тривалість інтервалу передавання змінювалась від 37,3 с до 44 с. Більшість інтервалів знаходилась у межах 37,3 с – 37,6 с. Розбіжність тривалості інтервалів обумовлена конкурентним доступом до каналу та випадковими чинниками. Усереднене значення пропускної здатності становить 54,805 Мбіт/с.

Під час десяти актів передавання файлу concert\_2.mp4 (836,567 МБ) у тому ж режимі з двома активними станціями, тривалість інтервалу передавання змінювалась від 118 с до 130 с. Переважна тривалість інтервалів була у межах від 118 с до 123 с. Усереднене значення пропускної здатності становить 54,856 Мбіт/с.

Усереднене значення пропускної здатності під час передавання файлу archive.zip розміром 120,851 МБ склало 54,442 Мбіт/с.

Перевірку пропускної здатності для режиму зі швидкістю з'єднання 150 Мбіт/с, в разі наявності в мережі чотирьох насичених станцій здійснювали за схемою, в якій дві станції одночасно передають однакові файли кожна своєму абоненту мережі через точку доступу.

У процесі експериментів інтервал передавання файлу кожної станції був відмінний від іншої станції. Розрахунок здійснювали за часом найменшого інтервалу, який знадобився першій станції, що завершила передавання файлу. Обсяги інформації, передані іншими станціями, були враховані фіксацією частки переданого ними файлу на момент завершення передавання першою станцією. Максимальне значення пропускної здатності безпроводової мережі з чотирма

насиченими станціями, якого вдалось досягти під час експерименту, склало 53,34 Мбіт/с.

Слід зазначити, що через наявність колізій в каналі, а також через вплив завад від суміжних каналів (інших мереж), точка доступу переходить на інший режим передавання, що призводить до зменшення пропускної здатності каналу. Так, під час експериментів пропускна здатність мережі з адаптивним вибором частотної смуги й чотирма насиченими станціями, за умови наявності в зоні експерименту інших безпроводових мереж, змінювалась від 9,1 Мбіт/с до 53,34 Мбіт/с. Найбільш часто під час експериментів пропускна здатність мережі набувала значень у межах від 22,218 Мбіт/с до 33,338 Мбіт/с. Такі значення пропускної здатності свідчать про те, що основним режимом функціонування мережі є режим з одним просторовим каналом і шириною частотної смуги радіоканалу 20 МГц.

Під час визначення пропускної здатності мережі з шістьма насиченими станціями із застосуванням файлу concert\_2.mp4 (836,567 МБ), найменший час передавання склав 3 хв. 34 с, а найбільший – 17 хв. 55 с. Пропускна здатність мережі за цих умов змінювалась, відповідно, від 50,676 Мбіт/с до 10,478 Мбіт/с.

Для оцінювання отриманих результатів можна скористатись теоретичними розрахунками, зробленими за методикою наведеною в розділі 3. Графіки розрахункової пропускної здатності безпроводової мережі, з урахуванням колізій і кількості насичених станцій, наведено на рис.4.2 та рис.4.3. Під час аналізу експериментальних даних та прогнозованих значень пропускної здатності треба також враховувати, що величина корисного навантаження в одному кадрі становила 1404 байти (визначено шляхом ділення переданої однією станцією корисної інформації на кількість кадрів).

Пунктиром на рис.4.3 наведено максимально можливі значення пропускної здатності без урахування колізій і повторного передавання окремих пакетів.

Порівняння отриманих в результаті експерименту значень пропускної здатності з прогнозованими значеннями, рис.4.2 – 4.3, свідчить про їх хорошу відповідність. Так розрахункове значення пропускної здатності каналу в разі

функціонування двох станцій в насиченому режимі становить 55,158 Мбіт/с, а експериментально визначене – 54,442 – 54,856 Мбіт/с. Розбіжність значень знаходиться в межах 1,3%

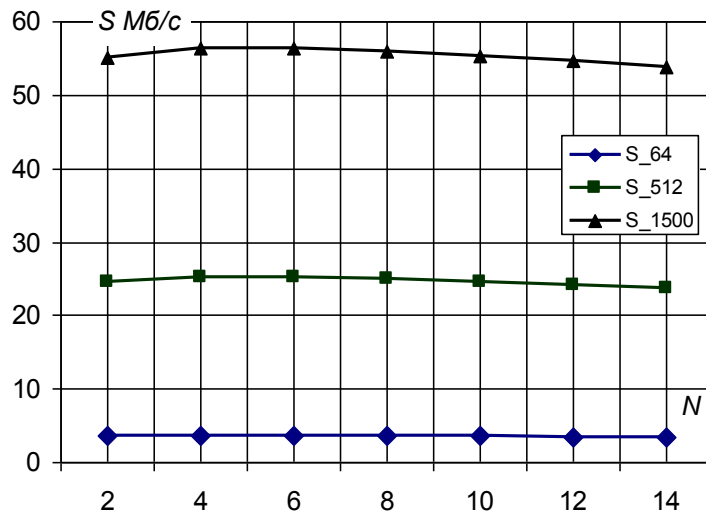


Рисунок 4.2 – Графік прогнозованої пропускної здатності мережі IEEE 802.11n в режимі зі швидкістю з'єднання 150 Мбіт/с у частотній смузі 40 МГц

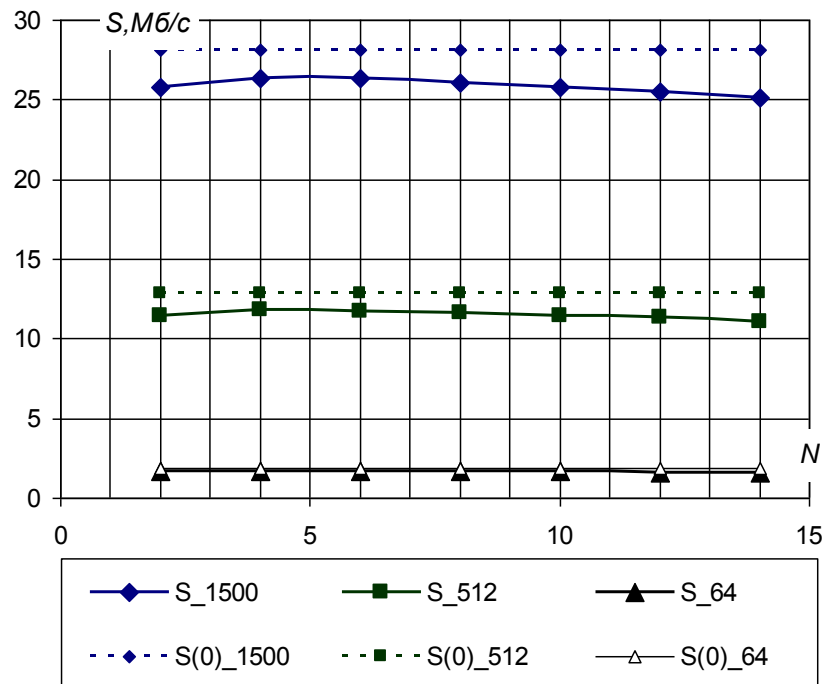


Рисунок 4.3 – Графік прогнозованої пропускної здатності мережі IEEE 802.11n в режимі зі швидкістю з'єднання 72 Мбіт/с у частотній смузі 20 МГц

Це, в свою чергу, свідчить про те, що запропонована методика і розрахункові співвідношення для оцінювання пропускної здатності безпроводової мережі з конкурентним режимом доступу [49-51, 54] враховує процеси в реальній

мережі і дає хороше співпадіння розрахункових та експериментальних значень.

Такий же результат отримано і для мереж, в яких функціонує чотири або шість активних станцій в насиченому режимі. Так у разі наявності чотирьох станцій розрахункова здатність становить 56,378 Мбіт/с, а експериментальна – 53,34 Мбіт/с. Похибка становить 5,39%. У разі наявності шести станцій розрахункова пропускна здатність становить 56,297 Мбіт/с, а визначена експериментально – 50,676 Мбіт/с. Похибка становить 9,98%.

Перевірка ефективності передавання та відтворення аудіовізуальних потоків підтвердила отримані вище оцінки щодо кількості потоків, для яких можна забезпечити якісне відтворення контенту в разі застосування мереж специфікацій IEEE 802.11a/n. Для мереж IEEE 802.11a (24 Мбіт/с) – це два потоки. Для мереж IEEE 802.11a/n (54 Мбіт/с та 72 Мбіт/с) – це три потоки.

У разі спроби передати ще один потік аудіовізуального контенту стандартної чіткості виникають неприйнятні затримки відтворення відеоряду і роз синхронізація відео та звукового ряду, виникають стоп-кадри та тривале зникнення звукового супроводу.

За результатами контролю додаткових параметрів мережі під час експериментів (зміна системної швидкості, що висвітлюється у контрольному вікні параметрів мережі на моніторі) можна стверджувати, що розбіжність розрахункових та експериментально визначених значень обумовлена впливом інших мереж, зони покриття яких частково перекриваються із зоною обслуговування експериментальної мережі. Як було зазначено вище час для здійснення експериментів було обрано так, щоб інтенсивність роботи інших безпроводових мереж IEEE 802.11 була мінімальною (мережі кафедри А та АЕ, кафедри КЕОА, кафедри мікроелектроніки, Інституту прикладної електроніки). Проте під час експериментів кожна із цих мереж епізодично передавала певні короткотермінові інформаційні потоки, чим погіршувала електромагнітну обстановку в межах експериментальної мережі. Чим довше тривав інтервал проведення експерименту, тим більше був вплив від зовнішніх мереж.

#### 4.4 Метод оцінювання ефективності використання ресурсів мережі коефіцієнтом корисного навантаження

Однією з обов'язкових характеристик специфікації безпроводової мережі стандарту 802.11 є максимальна швидкість передавання кодованих даних, яку може забезпечити безпроводова мережа з певними системними налаштуваннями (різновид схеми модуляції та кодування – MCS, ширина частотної смуги радіоканалу, кількість просторових каналів), табл. 1.1. Цей параметр зазвичай наводять як основну характеристику мережі, що вводять в оману користувачів, тому що він не дозволяє оцінити реальну швидкість передавання потоку даних, яку може забезпечити мережа.

Для характеристики ефективності використання ресурсів безпроводової мережі ми пропонуємо застосовувати метод коефіцієнта корисного навантаження мережі ( $k_{\text{кн}}$ ).

Коефіцієнт корисного навантаження мережі – це відношення прогнозованої або вимірної швидкості передавання корисної інформації до максимальна швидкість передавання кодованих даних (системна швидкість). Такий коефіцієнт дозволяє оцінити ефективність використання технологічних можливостей безпроводової мережі. Так, за результатами здійснених досліджень, рис.4.2 – 4.3, за сприятливих умов для режиму з шириною частотної смуги безпроводового каналу 40 МГц і системної швидкості 150 Мбіт/с,  $k_{\text{кн}}(2; 1500) = 0,366$ ,  $k_{\text{кн}}(2; 64) = 0,0238$ , а для режиму з шириною частотної смуги безпроводового каналу 20 МГц, 72 Мбіт/с  $k_{\text{кн}}(2; 1500) = 0,308$ ,  $k_{\text{кн}}(2; 1500) = 0,0232$ . В дужках наведено кількість станцій (перша цифра) та приблизне значення обсягу корисного навантаження в одному кадрі даних (друга цифра).

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



## 4.5 Вплив суміжних мереж на функціонування безпроводового каналу IEEE 802.11

Розглянемо тепер вплив інших мереж IEEE 802.11 на функціонування безпроводового каналу. Як відомо, у діапазоні 2,4 ГГц для технології Wi-Fi на території європейських країн передбачено використовувати 13 радіоканалів (1-13 канали) завширшки 22 МГц. Розподіл спектра й значення граничних частот наведено на рис. 1.18 та в табл. 4.1 [30].

Таблиця 4.1 – Параметри частотних смуг Wi-Fi в діапазоні 2,4 ГГц

Канал Wi-Fi	Нижня частота	Центральна частота	Верхня частота
1	2.401	2.412	2.423
2	2.406	2.417	2.428
3	2.411	2.422	2.433
4	2.416	2.427	2.438
5	2.421	2.432	2.443
6	2.426	2.437	2.448
7	2.431	2.442	2.453
8	2.436	2.447	2.458
9	2.441	2.452	2.463
10	2.446	2.457	2.468
11	2.451	2.462	2.473
12	2.456	2.467	2.478
13	2.461	2.472	2.483

Для визначення впливу сусідніх мереж визначимо вплив завад на виникнення спотворених кадрів даних у каналі передавання і проаналізуємо рівень завад, який створюють мережі з робочими частотними смугами, що перекриваються зі смугою даної мережі.

Вплив завад на процес передавання інформаційного потоку проаналізовано засобами моделювання системи ADS (AdvancedDesignSystem).

Моделювання зроблено для режиму передавання з MCS 7, тобто модуляція 64-QAM, швидкість завадостійкого коду  $R=5/6$ , для кадрів з корисним навантаженням  $PL=1500$ . Результати моделювання наведено на рис.4.5.

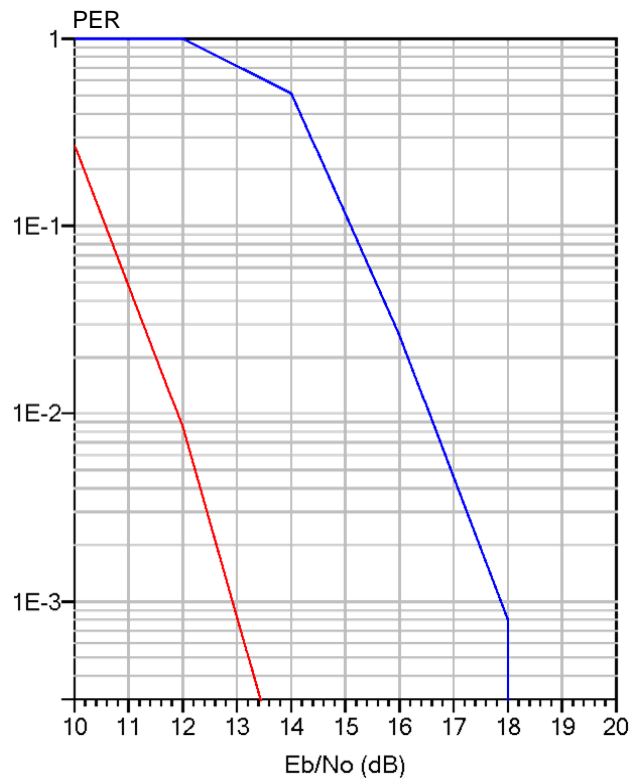


Рисунок 4.5 – Графік залежності коефіцієнта помилкових пакетів (*PER*) від відношення сигнал-шум

Ліва крива на графіку рис. 5.5 характеризує процес передавання в режимі MCS 3 (16-QAM,  $R=1/2$ ), права крива – в режимі MCS 7 (64-QAM,  $R=5/6$ ). Дві криві наведено для порівняння впливу завад, залежно від способу модуляції та кодування.

Оцінимо, як впливають втрачені через завади пакети (кадри) на пропускну здатність каналу. Зауважимо, що в разі втрати кадру відбувається його повторне передавання із застосуванням станцією, кадр якої був спотворений в каналі, механізму подолання колізії. Сам коефіцієнт помилкових пакетів *PER*, згідно зі способом його визначення, можна розглядати як ймовірність виникнення спотвореного кадру даних в каналі передавання, через наявність завад.

Таким чином, для визначення пропускну здатності каналу із завадами і оцінювання впливу завад на пропускну здатність, пропонуємо застосувати раніше запропоновані співвідношення [59] із заміною ймовірності колізій ( $p_c$ ) на ймовірність спотворення кадру, внаслідок колізії або впливу завад:

$$p_{ef} = p_c + PER - p_c \cdot PER. \quad (4.1)$$

Саму пропускну здатність можна обчислити за формулою [54]:

$$S = \frac{N \cdot E[PL_1] \cdot P_s}{T_{VCW}}, \quad (4.2)$$

де  $N$  – кількість активних станцій у безпроводовій мережі,  $E[PL_1]$  – усереднене корисне навантаження одного кадру,  $P_s$  – ймовірність успішного передавання кадру даних,  $T_{VCW}$  – тривалість реалізації віртуального конкурентного вікна.

Величину  $T_{VCW}$  з урахуванням завад треба обчислювати за співвідношенням:

$$T_{VCW} = N \cdot T_{PL} + N \cdot PER \cdot (T_{PL} + T_c) + n_c T_c + \sigma \cdot VCW, \quad (4.3)$$

де  $T_{PL}$  – час безпосереднього передавання кадру даних,  $T_c$  – тривалість інтервалу колізії, що має місце під час передавання кадру  $RTS$ ,  $n_c$  – кількість колізій за час реалізації конкурентного вікна,  $\sigma$  – тривалість системного часового слота,  $VCW$  – числове значення віртуального конкурентного вікна.

Другим доданком враховано, що спотворення може зазнати кадр даних і кадр керування.

Крім зазначених вище співвідношень у разі наявності завад треба відповідним чином скоригувати співвідношення для визначення ймовірності успішного передавання кадру даних. Таку корекцію треба зробити урахуванням співвідношення (4.1) під час обчислення (2.6).

Результати розрахунків пропускну здатності  $S_1$  безпроводового каналу мережі IEEE 802.11n за наявності завад наведено на рис.4.6.

На рис.4.6 зображено графіки пропускну здатності, що відповідають графіку помилкових бітів, наведеному на рис.4.5. Перший графік характеризує пропускну здатність мережі, коли відношення сигнал-шум  $E_b/N_0=16,5$  дБ ( $PER=0,01$ ), другий графік –  $E_b/N_0=15$  ( $PER=0,1$ ), третій графік –  $E_b/N_0=14,6$  ( $PER=0,2$ ). У разі, коли  $E_b/N_0 < 14$  дБ, передавання сигналу в режимі з MCS 7

взагалі стає неможливим, але можлива надійна робота в режимі з MCS 3 з максимальною швидкістю передавання до 33 Мбіт/с.

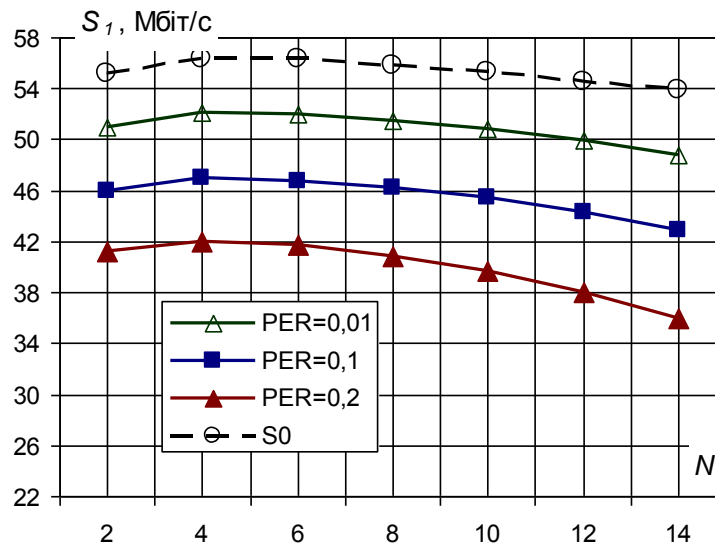


Рисунок 4.6 – Графіки залежності пропускної здатності безпроводового каналу IEEE802.11n

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

Проаналізуємо тепер питання стосовно того, за яких умов можна очікувати рівень сигнал-шум, розглянутий вище. Для цього розглянемо сюжет, за якого на певній відстані (кілька десятків метрів) від даної точки доступу (ТД1) знаходиться інша точка доступу (ТД2), що функціонує в тому ж частотному діапазоні 2,4 ГГц. Нехай ТД1 функціонує в частотному каналі 1, рис.4.2, а ТД2 функціонує в частотному каналі 3. Згідно з наведеною на рис. 4.2 діаграмою, частотні смуги каналів 1 і 3 перекриваються на половину частотної смуги. З урахуванням того, що модуляція OFDM формує шумоподібний спектр з квазірівномірним спектральним розподілом, у разі однакової випромінюваної потужності та ізотропного випромінювання антенами обох точок доступу на однаковій відстані від цих точок доступу, для станції першої мережі відношення сигнал/шум становитиме 3 дБ і, навпаки (такий самий рівень завад для сигналів ТД2 від ТД1).

Визначимо, на скільки треба зміститись в бік ТД1, щоб відношення сигнал-завада було більше 14-17 дБ, і можна було користуватись мережею з високою

швидкістю передавання сигналу. Для вирішення цього питання без урахування додаткових перешкод (будівельні конструкції, меблі, люди тощо) можна скористатись загальновідомим співвідношенням для визначення загасання електромагнітних хвиль у вільному просторі, а саме:

$$L, \text{дБ} = 20 \lg(4\pi df / c), \quad (4.4)$$

де  $d$  – відстань, яку долає хвиля (м),  $f$  – частота ( $2,4 \cdot 10^9$  Гц),  $c$  – швидкість світла ( $3 \cdot 10^8$  м/с).

Щоб досягти різниці рівнів сигналів від двох точок доступу в 17 дБ (з урахуванням 3 дБ ослаблення завади, за рахунок часткового перекриття частотних смуг), за їх однакової потужності випромінювання, необхідно, щоб різниця ходу електромагнітних хвиль відрізнялась в п'ять разів. Тобто, за умови наявності іншої точки доступу, робоча частотна смуга якої частково перекривається з частотною смугою точки доступу основної безпроводової мережі, для станції користувача, що знаходиться приблизно на однаковій відстані від точок доступу різних мереж, виникають умови, за яких рівень завад буде неприпустимо великий і передавання потокової інформації буде неможливе через втрату пакетів та значну нерівномірність затримки. Зазначений висновок знайшов повне підтвердження під час натурних експериментів.

Під час планування безпроводової мережі слід враховувати, що для забезпечення певного рівня пропускної здатності каналу треба забезпечити певний мінімальний рівень сигналу на вході приймача. Для максимальної швидкості передавання у мережі IEEE 802.11n треба, щоб потужність на вході приймача була не менше «мінус» 64 дБм.

#### **Висновки до розділу 4**

1. Максимальна пропускна здатність інформаційного каналу безпроводової мережі IEEE802.11n в режимі функціонування зі швидкістю з'єднання 150 Мбіт/с не перевищує 57 Мбіт/с. Максимальне значення коефіцієнта корисного

навантаження  $k_{\text{кн}}$  для мережі з одним просторовим каналом становить 0,3 – 0,37.

2. За наявності кількох активних станцій у безпроводовій мережі, пропускна здатність залежить від взаємного розташування абонентських станцій та точки доступу. У разі насиченого навантаження активних станцій, найменша сумарна пропускна здатність буде тоді, коли станції розташовані приблизно в одному напрямку відносно точки доступу (мале кутове рознесення).

3. За наявності в мережі чотирьох і більше станцій, що функціонують в насиченому режимі, мережа IEEE 802.11n переходить на режим з пониженою швидкістю завадостійкого кодування і не можливо реалізувати найбільш швидкісні режими передавання даних.

4. У разі наявності поблизу безпроводової мережі іншої мережі стандарту 802.11, для приймальної станції, що знаходиться на сумірній відстані від обох точок доступу, виникають умови, за яких навіть незначне переміщення робочої станції може призвести до значної зміни пропускної здатності.

5. У разі передавання відеопотоку в мережі IEEE 802.11n в смузі частот 20 МГц з одним просторовим потоком має місце якісне передавання та відтворення аудіовізуального потоку сформованого із застосуванням кодеку MPEG 4 (розширення .mp4), наявність у мережі іще двох станцій з насиченим навантаженням призводить до порушення безперервності відтворення відеопотоку та розсинхронізування відео та аудіо потоків.

6. Запропоновані в дисертації розрахункові співвідношення для визначення експлуатаційних характеристик безпроводових мереж 802.11 дозволяють отримати результати, які співпадають з результатами натурних випробувань, що дозволяє застосовувати ці співвідношення для планування безпроводових мереж та удосконалення режимів вже розгорнутих.

## ВИСНОВКИ

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

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

2. Розроблено удосконалену математичну модель процесу передавання потоків даних в безпроводових мережах стандарту IEEE 802.11 з конкурентним доступом, що містить набір математичних співвідношень для прогнозування експлуатаційних характеристик безпроводової мережі. На відміну від попередніх в цій моделі враховано функціональні зв'язки між системними параметрами (кількість активних станцій, кількість повторних спроб передавання, мінімальне значення конкурентного вікна) та стохастичними параметрами мережі

(ймовірність колізій, ймовірність успішного передавання, ймовірність втрати пакету, кількість вільних часових слотів тощо). Показано, що в мережі з конкурентним доступом кількість станцій, що конкурують за канал менше загальної кількості активних станцій внаслідок реалізації механізму повторного передавання кадрів даних.

3. Запропоновано метод оцінювання граничних значень експлуатаційних характеристик безпроводових мереж IEEE 802.11 в режимі конкурентного доступу, що ґрунтується на застосуванні удосконаленої математичної моделі. Отримано граничні значення пропускної здатності, середньої затримки передавання, нерівномірності середньої затримки, ймовірності втрати пакету для мереж IEEE 802.11a/n. З'ясовано, що в разі використання одного просторового каналу безпроводової мережі IEEE 802.11n у змішаному режимі з системною швидкістю 72 Мбіт/с або мережі IEEE 802.11a з системною швидкістю 54 Мбіт/с може забезпечити передавання одночасно до 14 голосових з'єднань або передавання до 3 аудіовізуальних потоків зі звичайною роздільною здатністю з високою якістю надання послуги.

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

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



рішень, спрямованих на удосконалення технології передавання даних засобами безпроводової мережі.

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

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

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

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

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Архитектура IEEE 802.11. /ИНТУИТ. –URL: <https://www.intuit.ru/studies/courses/1004/202/lecture/5238?page=1>, 25.03.2017 (дата звернення: 19.03.2019).
2. Пахомов С. Анатомия беспроводных сетей. *Компьютер Пресс*. 2002. № 7. С.167–175. URL: <http://ab57.ru/soft/wifidoc.pdf> (дата звернення: 10.02.2019).
3. Новый стандарт 802.11ax: увеличение производительности WI-FI в 4 раза. 2019. URL: <https://lanmarket.ua/stats/novyyu-standart-802-11ax-uvelichenie-proizvoditelnosti-wi-fi-v-4-raza> (дата звернення: 7.02.2019)..
4. Вишневецкий В. М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. Москва. 2005. 592 с.
5. Григорьев В. А., Лагутенко, Ю. А. Распаев. Сети и системы радиодоступа. Москва. 2005. 384 с.
6. Недашківський О.Л. Методологія підвищення ефективності надання телекомунікаційних послуг в мультисервісних мережах». Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора техн. наук: 05.12.02. Київ, 2018 р. 421 с.
7. WLAN DCF vs PCF-Difference between DCF and PCF medium access types. URL: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/WLAN-DCF-vs-PCF.html>. (дата звернення: 10.02.2019).
8. Чан Д., Симонина О. Механизм мультиопроса в высокоплотных сетях IEEE 802.11. *Технологии и средства связи*. 2017. № 1. С. 39–41.
9. Андрианова Ю. Новые задачи беспроводных сетей. *Форум Cisco*. 2018. 42 с. URL: [https://www.cisco.com/c/dam/m/ru\\_ru/training-events/2018/north-west-cisco-forum/pdfs/10Julia\\_Andrainova\\_Wireless\\_DNAC-A.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/m/ru_ru/training-events/2018/north-west-cisco-forum/pdfs/10Julia_Andrainova_Wireless_DNAC-A.pdf) (дата звернення: 10.02.2019).
10. Модуль 802.11ac для точки доступа Cisco Aironet. *Информационный бюллетень*. 2013 8 с. URL: [https://www.cisco.com/c/dam/global/ru\\_ru/downloads/broch/802\\_1ac-Module-Data-Sheet-AA\\_RU.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/global/ru_ru/downloads/broch/802_1ac-Module-Data-Sheet-AA_RU.pdf) (дата звернення: 10.02.2019).
11. Смирнова Е. В., Пролетарский А. В. Технологии современных

беспроводных сетей Wi-Fi. Москва. 2017. 446 с.

12. Основные особенности стандарта 802.11ac. CBS компания. 2016. URL: <https://habr.com/ru/company/cbs/blog/274267/> (дата звернения: 10.02.2019).

13. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification – 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA: IEEE Std 802.11, 2007. – 1232 с. – (2007 Edition). <https://www.iith.ac.in/~tbr/teaching/docs/802.11-2007.pdf> (дата звернения: 10.02.2019).

14. Giuseppe B. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2000. vol. 18. №. 3. С. 1055 – 1067.

15. Макаренко В. В. 802.11ax – новая версия стандарта высокоскоростной системы связи Wi-Fi. *Электронные компоненты и системы*. 2017. №2. С. 42–51.

16. Беспроводные сети передачи данных на базе технологии размытого спектра радиочастот. URL: [http://old.ci.ru/inform16\\_98/raamax.htm](http://old.ci.ru/inform16_98/raamax.htm) (дата звернения: 10.02.2019).

17. 802.11 OFDM Overview. URL: [http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/wlan-ofdm/Content/ofdm\\_80211-overview.htm](http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/wlan-ofdm/Content/ofdm_80211-overview.htm) (дата звернения: 10.02.2019).

18. IEEE 802.11n Standard. *Electronics-notes*. URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/802-11n.php> (дата звернения: 10.02.2019).

19. Основные особенности стандарта 802.11ac. CBS Компания. 2016. URL: <https://habr.com/ru/company/cbs/blog/274267/> (дата звернения: 10.02.2019).

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

21. Макаренко В. В. Особенности стандарта беспроводной связи IEEE 802.11ac (Wi-Fi). *Электронные компоненты и системы*. 2012. №7 С.28-35.

22. Пространственные потоки в устройствах WiFi-стандарта с MIMO. URL:

<http://wi-life.ru/wifi-academy-rus/wifi-academy-mimo-spatial-streams> (дата звернення: 10.02.2019).

23. Новый стандарт 802.11ax: увеличение производительности WI-FI в 4 раза. URL: <https://lanmarket.ua/stats/novyyu-standart-802-11ax-uvelichenie-proizvoditelnosti-wi-fi-v-4-raza> (дата звернення: 10.02.2019).

24. Кирьянов А. Г., Ляхов А. И., Михлина Д. А. Проблемы создания IEEE802.11ax – нового поколения сетей Wi-Fi. *Информационные процессы*. 2016. №1. С. 1–12.

25. Что такое 802.11ax – обзор нового стандарта WI-FI 6. URL: <https://www.sit-com.ru/802-11ax-review-wifi6.html> (дата звернення: 10.02.2019).

26. Типы фреймов сети стандарта IEEE 802.11. *Практика применения Wi-Fi*. URL: <http://wi-life.ru/tehnologii/wi-fi/wi-fi-frames-manage-ment-control-data> (дата звернення: 10.02.2019).

27. Денисов Д. Тестирование TCP, UDP-трафика в сети Wi-Fi 802.11n/ac. URL: <http://www.wireless.ua/1641-testirovanie-tcp-udp-trafika-v-seti-wi-fi-80211nac.html> (дата звернення: 10.02.2019).

28. Mardeni R. K., Anuar A. R., Salamat M. G., USOP I. Y. Investigation of IEEE 802.11ac signal strength performance in Wi-Fi communication system. *International Journal Of Electrical, Electronics And Data Communication: collection of works*. Vol. 4. Issue11. (Osaka, Japan. Nov.-2016). 2016. С. 27–31. URL: [http://www.ijraj.in/journal/journal\\_file/journal\\_pdf/1-312-148128517727-31.pdf](http://www.ijraj.in/journal/journal_file/journal_pdf/1-312-148128517727-31.pdf) (дата звернення: 10.02.2019).

29. Saha S., Deshpande P., Inamdar P. Power-throughput tradeoffs of 802.11n/ac in smartphones. URL: <https://cse.buffalo.edu/faculty/dimitrio/publications/infocom15.pdf> (дата звернення: 10.02.2019).

30. Денисов Д. В Wi-Fi «закончились» частоты. Решение – DFS. URL: <https://nag.ru/articles/article/32561/v-wi-fi-zakonchilis-chastoty-reshenie-dfs.html> (дата звернення: 10.02.2019).

31. Инь Ч. Особенности публичных сетей беспроводного доступа на основе технологии Wi-Fi. *ЕЛЕКТРОНІКА-2015: Збірник статей 8 міжнар. наук.-техн.*

конф. (Київ, 15-17 квітня 2015). Київ. 2015. С.266-270.

32. Частотные полосы и каналы Wi-Fi. *Практика применения Wi-Fi*. URL: <http://wi-life.ru/tehnologii/wi-fi/wi-fi-frequency-bands-and-channels> (дата звернення: 10.02.2019).

33. Very High-Density 802.11ac Networks. Theory Guide. *Aruba Networks, Inc.* URL: [http://www.arubanetworks.com/assets/vrd/Aruba\\_VHD\\_VRD\\_Planning\\_Guide.pdf](http://www.arubanetworks.com/assets/vrd/Aruba_VHD_VRD_Planning_Guide.pdf) (дата звернення: 10.02.2019).

34. Takuya S., Nobuyoshi K., Hiroo S. Maximum Throughput Analysis for RTS/CTS-used IEEE 802.11 DCF in Wireless Multi-hop Networks. URL: <https://www.researchgate.net/publication/251945320> (дата звернення: 10.02.2019).

35. Vishnevsky V. M., Lyakhov A. I. IEEE 802.11 wireless LAN: Saturation throughput analysis with seizing effect consideration. *Cluster Computing*. 2002. Vol. 5. № 2. С. 133–144.

36. Ландырев А.Г., Иванов А.В. Исследование производительности беспроводной сети с использованием модели Бианчи. URL: <http://network-journal.mpei.ac.ru/cgi-bin/main.pl?l=ru&n=26&pa=4&ar=1> (дата звернення: 10.02.2019).

37. Jean-Lien C. W. Liu H., Yi-Jen L. An adaptive multi rate IEEE 802.11 wireless LAN. *In Proc. 15th International Conference on Information Networking*. 2001. С. 411–418.

38. Daji Q., Sunghyun C., Kang G. S. Goodput Analysis and Link Adaptation for IEEE 802.11a Wireless LANs. *IEEE Trans. on Mobile Computing (TMC)*. 2002. vol. 1. № 4. С. 278–292.

39. Вишнеvский В. М., Ляхов А. И., Якимов М. Ю. Оптимизация работы высокоскоростной беспроводной сети в условиях помех. *Электросвязь*. 2007. № 8. С. 16–19.

40. Ляхов А. И., Пустогаров И. А., Гудилов А. С. Проблема неравномерного распределения пропускной способности канала в сетях IEEE 802.11. *Информационные процессы*. 2008. Том 8. № 3. С. 149–167.

41. Liao R., Bellalta B., Barcelo J. Performance analysis of IEEE 802.11ac

wireless backhaul networks in saturated conditions. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. URL: <https://jwcn-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-1499-2013-226> (дата звернення: 10.02.2019).

42. Timo V. Wi-Fi Capacity Analysis for 802.11ac and 802.11n: Theory & Practice. *Ekahau*. 2015. 21 p. URL: [https://www.ekahau.com/wp-content/uploads/2017/01/Wi-Fi\\_Capacity\\_Analysis\\_WP.pdf](https://www.ekahau.com/wp-content/uploads/2017/01/Wi-Fi_Capacity_Analysis_WP.pdf) (дата звернення: 10.02.2019).

43. Рошан П., Лиэри Д. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11. Москва: Вильямс. 2004. 304 с.

44. Проценко М. Б., Рожковська І. Ю. Аналіз аналітичних моделей для MIMO систем. *Наукові праці ОНАЗ ім. Попова*. 2009. № 2. С. 3–9.

45. Javier D. P., Sunghyun C. Link Adaptation Strategy for IEEE 802.11 WLAN via Received Signal Strength Measurement. In Proc. IEEE ICC'03. USA. Alaska. Anchorage. 2003. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1204534> (дата звернення: 10.02.2019).

46. Hadzi-Velkov Z., Spasenovski B. Saturation Throughput – Delay Analysis of IEEE 802.11 DCF in Fading Channels. In Proc. IEEE ICC'03, USA. Alaska. Anchorage. 2003. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1204154> (дата звернення: 10.02.2019).

47. Emerging Technologies in Wireless LANs. Theory, Design, and Deployment. // Edited by BENNY BING. Georgia Institute of Technology. Cambridge University Press. 2008. 897 p.

48. 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. № 1. С. 7–13. URL: <http://doi.org/10.11648/j.wcmc.20130101.12> (дата звернення: 10.02.2019).

49. Lazebnyi V., Yin Ch. Some aspects of wireless Wi-Fi network throughput calculation. *International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*: праці 14 міжнор. Наук.-

техн. конф. (Львів, 20-24 лютого 2018 р.). Львів. 2018. р.353-358.

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

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

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

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

54. Кубасов И. А., Сердюков П. Н., Пучков Г. Ю. Оценка пропускной способности и дальности связи при использовании WI-FI аппаратуры в реальных городских условиях. *Специальная техника*. 2013. №2. С. 44–47.

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

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

57. Charfi E., Chaari L., Kamoun L. PHY/MAC Enhancements and QoS Mechanisms for Very High Throughput WLANs: A Survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. 2013. vol. 15. №4. С. 1714–1735.

58.Визначення змісту понять: «ефект», «ефективність» та «результативність». *WEB-ресурс научно-практических конференций*. 2018. URL: [www.confcontact.com/20121221/3\\_gupalo.htm](http://www.confcontact.com/20121221/3_gupalo.htm) (дата звернення: 10.02.2019) (дата звернення: 10.02.2019)..

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

60.Анализ трафика для голоса поверх IP. *CISCO. Анализ трафика*. URL: [https://www.cisco.com/c/ru\\_ru/td/docs/ios/solutions\\_docs/voip\\_solutions/TA\\_ISD.html#xtocid29](https://www.cisco.com/c/ru_ru/td/docs/ios/solutions_docs/voip_solutions/TA_ISD.html#xtocid29) (дата звернення: 10.02.2019).

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

62.Broadcasting of multimedia and data applications for mobile reception by handheld receivers. Recommendation. *Recommendation ITU-R BT.1833-3. BT Series. Broadcasting service (television)*. Geneva. 2014. 7 p.

63.VoIP – потребление полосы пропускания в расчете на вызов. Cisco Systems, Inc. URL: [https://www.cisco.com/cisco/web/support/RU/106/1068/1068305\\_bwidth\\_consume.pdf](https://www.cisco.com/cisco/web/support/RU/106/1068/1068305_bwidth_consume.pdf) (дата звернення: 10.02.2019).

64. Барг А. И., Колгатин С. Ю., Колпаков И. А.. IP\_телевидение. Головные станции. *T-Comm*. 2007. № 1. С. 37–43.

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

66.Битрейт в H.264. *Гильдия режиссёров монтажа*. URL: <http://editorsguild.ru/articles/all/%20B2-h-264> (дата звернення: 10.02.2019).

67.Передача потокового видео в сетях: руководство THG. Часть I. *Форум THG.ru*. URL: [http://www.thg.ru/network/video\\_streaming\\_i/video\\_streaming\\_i-01.html](http://www.thg.ru/network/video_streaming_i/video_streaming_i-01.html) (дата звернення: 10.02.2019).



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

Додаток А. Довідка про впровадження результатів дослідження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор  
Національного технічного університету  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»  
академік НАН України, професор



Ю.І.Якименко

## ДОВІДКА

про впровадження в навчальний процес кафедри звукотехніки та реєстрації інформації Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» результатів дисертаційної роботи Ін'Ченлян на тему «**Дослідження та розроблення методики оцінювання ефективності передавання аудіовізуальної інформації засобами безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11**», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Наукові положення та результати дисертаційної роботи Ін'Ченлян «Дослідження та розроблення методики оцінювання ефективності передавання аудіовізуальної інформації засобами безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11» використовуються для викладання дисципліни «Технології безпроводових локальних мереж» для студентів спеціальності 171 Електроніка, що навчаються за освітньою професійною програмою підготовки бакалаврів «Електронні системи мультимедіа та засоби Інтернету речей». Результати дисертації використано в лекційному курсі та завданнях до практичних робіт за темою «Технології локальних мереж IEEE 802.11».

Декан факультету електроніки  
д.т.н., професор

  
Жуйков В.Я.

Завідувач кафедри звукотехніки  
та реєстрації інформації  
д.т.н., професор

  
Г.Г. Власюк

**ДОДАТОК Б**  
**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА**  
**ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ**

**Список публікацій здобувача**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### **Відомості про апробацію результатів дисертації**

1. VIII міжнародна науково-технічна конференція «Електроніка-2015» 15-17 квітня 2015, Київ.

2. X міжнародна науково-технічна конференція «Електроніка-2017» 25-27 квітня 2017 р.. Київ.

3. Науково-технічна конференція «Сучасні проблеми застосування

електронних та інформаційних технологій в телекомунікаціях, телебаченні та цифровому кінематографі». 25 травня 2017 р. Київ.

4. XIV міжнародна науково-технічна конференція «International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)». 20-24 лютого 2018 р. Львів.

5. XI міжнародна науково-технічна конференція «Електроніка-2018» 3 – 5 квітня 2018 р. Київ.

6. XII міжнародна науково-технічна конференція «Електроніка-2019» 23-25 квітня, 2019. Київ.