

УДК 621.391.8

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/10>**Михалевський Д.В.**

Вінницький національний технічний університет

Макогон В.І.

Вінницький національний технічний університет

Ентін І.І.

Вінницький національний технічний університет

ОЦІНЮВАННЯ ПОКРИТТЯ КОРПОРАТИВНИХ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ WI-FI У ПРИМІЩЕННІ

У роботі проведено дослідження випадкових закономірностей, що пов'язані із дією випадкових факторів впливу рознесених у просторі для корпоративних мереж стандарту Wi-Fi. Наведено результати експериментальних досліджень покриття сигналу у приміщеннях для кутового та центрального положень точки доступу, отриманих за допомогою алгоритмів моніторингу. На базі отриманих даних проведено статистичні дослідження та запропоновано середньо-статистичну модель оцінювання покриття із врахуванням дії динамічних факторів впливу на базі інтервалів флуктуацій. Для досліджень було створено умови існування безпроводних каналів із випадковою конфігурацією у різноманітних приміщеннях та відповідною кількістю факторів впливу та враховувався фактор просторового рознесення мереж та незалежних періодів моніторингу.

Встановлено, що незалежно від використовуваного діапазону частот, середньостатистичне значення рівня флуктуації потужності сигналу на вході приймача становило $\pm 2,5$ дБм для приміщень із незначною наповненістю. При заповненні приміщення об'єктами більше 25%, що створює додаткові поверхні відбиття, флуктуації біля архітектурних перешок збільшуються до ± 5 дБм. При існуванні цегляних або бетонних конструкцій флуктуації збільшуються до $\delta = \pm 10$ дБм за ними. Частотний діапазон мережі майже не вносить змін для флуктуацій потужності сигналу. Крім того, центральне положення точки доступу дає можливість чітко визначати внутрішні архітектурні перешки та рівень флуктуації за ними. Це дає підстави стверджувати про середньо-статистичну подібність функціонування мереж стандарту Wi-Fi в умовах дії різного роду факторів впливу, незалежно від розташування.

Вдосконалено узагальнену модель оцінювання покриття корпоративних мереж стандарту Wi-Fi на базі статистичного аналізу експериментальних досліджень, яка враховує існування всіх факторів впливу у приміщенні, а також фактор просторового рознесення мереж та незалежних періодів моніторингу в різних умовах.

Ключові слова: оцінювання, безпроводні канали, експериментальна модель, корпоративна телекомунікаційна мережа, архітектурні перешки, статистичний аналіз.

Постановка проблеми. Відомо [1], що до основних задач, які висуваються на етапі проектування корпоративних телекомунікаційних мереж, можна віднести досягнення максимально можливої пропускної здатності каналу передачі інформації, як базової складової, та його стабільності для будь-якого абонентського пристрою. Але тенденція широкого впровадження безпроводних технологій приводить до появи ряду негативних факторів, які забезпечують виникнення затримок та помилок під час сеансів передачі трафіку [2]. Для мінімізації таких факторів можуть викорис-

товуватись моделі та методи оцінювання основних параметрів каналів із подальшою оптимізацією топології мереж на етапах проектування та експлуатації, які враховують природу та характер впливу. Для підвищення достовірності оцінювання необхідно отримати значну кількість статистичних результатів для встановлення особливостей впливу того чи іншого фактору. Тому, є актуальним, проведення незалежних експериментальних досліджень для підвищення ефективності існуючих моделей оцінювання параметрів корпоративних телекомунікаційних мереж.

© Михалевський Д.В., Макогон В.І., Ентін І.І., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [3], проведено експериментальні дослідження розподілу сигналу у приміщенні для кутового положення точки доступу використовуючи алгоритми моніторингу. Встановлено, що покриття мережі можна охарактеризувати як досить нерівномірну поверхню, із значно вираженими флуктуаціями. Рівень таких флуктуацій збільшується при наближенні до стін та може бути визначений на основі впровадження довірчого інтервалу. Такий фактор має значний вплив на проектування корпоративних мереж, створюючи невизначеність покриття для кожної окремої точки доступу, що показують дослідження у роботі [4]. Умови поширення сигналу у приміщеннях приводить до великих помилок при визначенні місць розташування вузлів для створення оптимального покриття. Одним із напрямків підвищення достовірності оцінювання покриття мережі можна виконувати на базі аналізу експериментальних досліджень квадратичними функціями. Такі дослідження було проведено у роботі [5]. Встановлено, що існування значних флуктуацій спостерігається до двох метрів від точки доступу із значно вираженими максимумами, які в подальшому зменшуються. Щодо середньостатистичного значення флуктуацій, то біля стін вони мають менший інтервал відхилення, навіть при наявності великої кількості відбиваючих поверхонь. Доведено, при симетричному поділу розмірів приміщення, для розподілу потужності сигналу є характерним представлення сигналу як модель затухання у вільному просторі, але при умові мінімального впливу відбиваючих поверхонь. Таким чином за результатами досліджень можна стверджувати, що використовувати квадратичне затухання за координатами довжини та ширини є найбільш оптимальним для оцінювання покриття мережі у приміщеннях. Для оцінювання впливу архітектурних перешкод та ефекту багатопроменевого поширення хвиль доцільно використовувати інтервал флуктуацій основного енергетичного параметра, для врахування будь-яких змін параметрів середовища передачі в режимі реального часу.

Існування різних типів перешкод значно обмежує продуктивність безпроводних каналів корпоративних телекомунікаційних мереж, що можна порівняти із дією DoS-атак [6]. Як наслідок, виникають помилки у кадрах, що приводить до збільшення циклів повторної передачі. Подібну інтерференційну картину отримано для частотного діапазону 5 ГГц, за рахунок великої кіль-

кості відбиваючих поверхонь у приміщеннях, яку можна оцінювати на основі квадратичної функції [7]. Крім того, на оцінювання покриття мережі мають вплив фактори що відносяться до характеристик приймальної частини пристроїв стандарту 802.11 [8-9]. Їх можна поділити на дві групи: енергетичні (положення приймально-передавального обладнання в просторі, попадання пристрою в максимум або мінімум характеристик розподілу сигналу у приміщенні, чутливість, характеристики антен та ін.) і інформаційні (повторні цикли передачі кадрів і пакетів, джиттер, додаткова службова інформація та ін.) [10-11]. В більшості випадків відмінності у приймально-передавальному тракті різних виробників можна оцінювати на основі додаткових коефіцієнтів флуктуацій параметрів моделей оцінювання покриття. Таким чином, досить важливим фактором, який впливає на моделі оцінювання можна вважати і параметри приймально-передавального обладнання різних виробників, із врахуванням факторів обмеження пропускної здатності внутрішньої шини обміну даними та чутливості [12]. Достовірність методів та адекватність запропонованих моделей залежить від кількості проведених експериментальних досліджень, на основі яких, отримано коефіцієнти та допустимі границі, що підтверджують доцільність застосування квадратичних функцій та використання інтервалів флуктуацій їх параметрів. Проте, такі дослідження не враховують особливості просторового рознесення мереж, спостереження різних періодів моніторингу та використання випадково-конфігурованого обладнання. Тому, для підвищення достовірності існуючих методів та моделей оцінювання основних параметрів корпоративних телекомунікаційних мереж, є актуальним провести ряд незалежних досліджень для визначення впливу вказаного фактору.

Метою статті є оцінювання фактору впливу просторового рознесення мереж та випадково-конфігурованого обладнання в різних умовах при побудові корпоративних телекомунікаційних мереж стандарту Wi-Fi та отримання середньостатистичної моделі поширення сигналу у приміщенні із врахуванням дії динамічних факторів впливу на базі інтервалів флуктуацій.

Виклад основного матеріалу. Для оцінювання впливу випадково-конфігурованого обладнання було проведено ряд експериментальних досліджень. Для цього використано обладнання стандарту Wi-Fi різних виробників та налаштування за замовчуванням, враховуючи стандарти Wi-Fi 4,

Wi-Fi 5 та Wi-Fi 6. Для врахування просторового рознесення та різноманітних умов, локальні мережі розгортались у непов'язаних між собою приміщеннях. Структура мережі для проведення дослідження наведено на рис. 1.

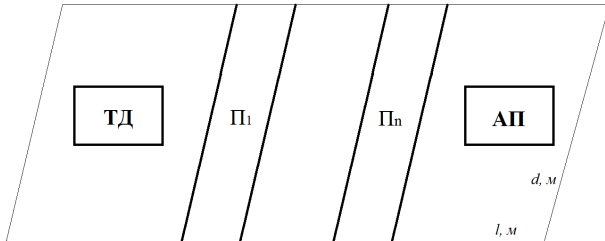


Рис. 1. Результати експериментальних досліджень для кутового положення точки доступу у приміщенні

Методика досліджень передбачає створення безпроводного каналу, у приміщенні за допомогою приймально-передавального обладнання точки доступу (ТД) та абонентського пристрою (АП) стандарту Wi-Fi, як вимірювального засобу із застосуванням вбудованих алгоритмів та програмних додатків моніторингу для вимірювання потужності сигналу на вході приймача P_m [3].

В каналі, для різних приміщень, існувати архітектурні перешкоди $P_1 \dots P_n$. Дослідження проведено незалежними дослідниками, вибір частотного діапазону та смуги каналу не обмежувався. Випромінювальна потужність ТД встановлювалась за замовчуванням, що для нашого регіону становить 100 мВт.

Використовуючи наведену методику досліджень, отримано значну кількість поверхонь поширення сигналу у приміщеннях. Аналіз експериментальних досліджень проведено на базі статистичних методів та представлено результати, які мають відхилення від середньостатистичного значення і поділено на групи для кутового та центрального положення ТД, згідно [3,5].

Найбільш вагомими результатами досліджень для кутового положення точки доступу, наведено на рис. 2.

Результати на рис. 2 показують існування флуктуацій, які спричинені фактором існування складної інтерференційної картини, що є багатопроменим поширенням хвиль. Рівень флуктуацій залежить від значної кількості відбиваючих поверхонь. Отримані результати мають аналогічну характеристику як і у роботі [3]. На базі ста-

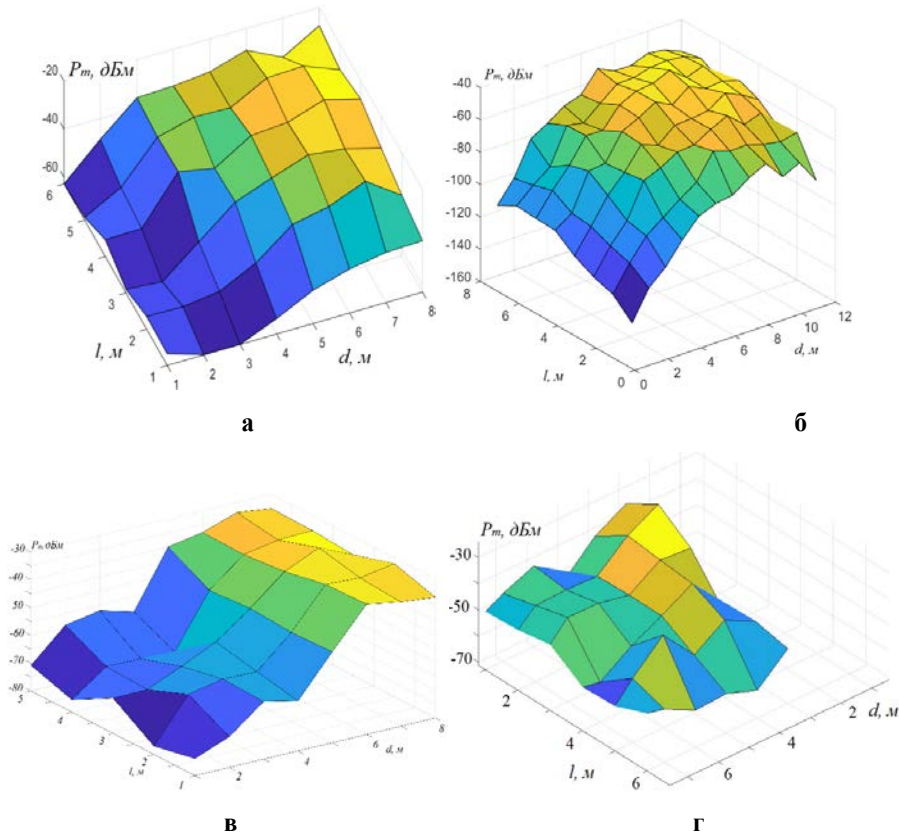


Рис. 2. Результати експериментальних досліджень для кутового положення точки доступу у приміщенні

тистичного аналізу, встановлено, що зафіксоване середньостатистичне значення рівня флуктуації потужності сигналу на вході абонентського пристрою становить $\delta = \pm 2,5$ дБм (див. рис. 1, а,б), для приміщень із незначною наповненістю, та $\delta = \pm 5$ дБм (див. рис. 1, в,г), при існуванні значної кількості об'єктів та поверхонь відбиття. Крім того, останній інтервал показує безпосередню близькість до архітектурних перешкод у приміщеннях, за якими рівень флуктуації збільшується до $\delta = \pm 10$ дБм, особливо при використанні цегляних та бетонних конструкцій. Використання різних частотних діапазонів значного впливу на рівень флуктуації не мало.

Результати досліджень для центрального положення точки доступу [5] наведено на рис. 3.

В даному випадку, підтверджується встановлене твердження пов'язане із існуванням максимуму концентрації енергії випромінювання на відстані до двох метрів від випромінюючої антени точки доступу. Хоча, з точки зору приймального пристрою, не завжди спостерігається, що дає можливість ним нехтувати при оцінюванні покриття мереж стандарту Wi-Fi на базі експериментальних моделей. Це є доцільним для багатьох пристроїв із низькою чутливістю, а також їх використання, як контрольних засобів оцінювання покриття при довільному

положенні у просторі, що підтверджується статистичним аналізом отриманих результатів досліджень. Інтервал флуктуації є дещо меншим за рахунок кращого покриття при існуванні незначних архітектурних перешкод (див. рис. 3. а, б).

Аналогічно до попереднього випадку, частотний діапазон мережі майже не вносить змін у рівень флуктуації основного енергетичного параметра сигналу. Крім того, центральне положення точки доступу дає можливість чітко визначати внутрішні архітектурні перешкоди та рівень флуктуації за ними, як видно із рис. 2. в, г.

Враховуючи отримані результати у роботах [3, 5, 7] та статистичний аналіз отриманих експериментальних досліджень, можна стверджувати, що найбільшу ефективність оцінювання покриття корпоративних мереж стандарту Wi-Fi у приміщеннях, дає функція затухання за координатами l і d на основі поліноміальної моделі за значенням 2. Таким чином, модель покриття мережі можна записати так:

$$\begin{cases} P_{Rx}(l) = al^2 + bl + P_0 + \delta, \\ P_{Rx}(d) = kd^2 + nd + P_0 + \delta. \end{cases} \quad (1)$$

де a, b, k, n – коефіцієнти затухання сигналу по відповідній координаті; P_0 і δ – початковий рівень із інтервалом флуктуації.

Рівняння (1) показує середньостатистичну модель для всіх випадків досліджень. Але на

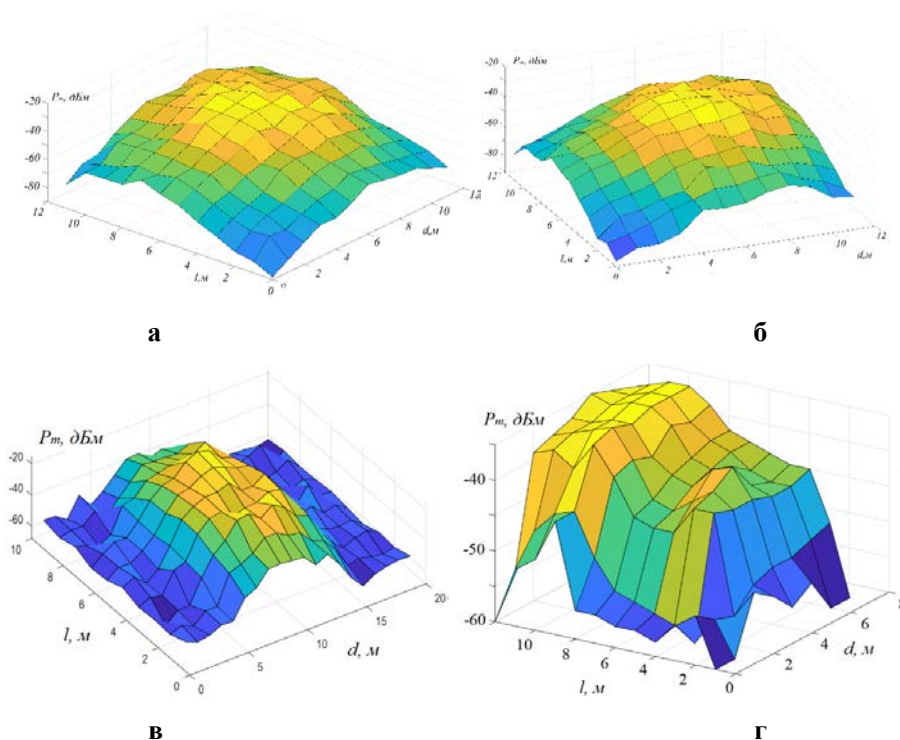


Рис. 3. Результати експериментальних досліджень для центрального положення точки доступу у приміщенні

графіках спостерігаються відхилення, які мають виражені максимуми та мінімуми в певних інтервалах. Такі інтервали можна визначати через границі інтервалів флуктуацій основного параметра [3]. Але, додатково спостерігається відхилення що спричинене додатковими факторами впливу що існують в різних приміщеннях та відхиленням технічних показників у випадково-конфігурованого обладнання. Тому, враховуючи інтервали флуктуацій та контрольний абонентський пристрій, для будь-якого положення у приміщенні як $(l_0; d_0)$, модель (1) для будь-якого вимірювального пристрою можна записати так:

$$\begin{cases} P_{rx}(l) = (a \pm \Delta a \pm \Delta_1)(l^2 - l_0^2) + (b \pm \Delta b \pm \Delta_2)(l - l_0) + P_m + \delta, \\ P_{rx}(d) = (k \pm \Delta k \pm \Delta_3)(d^2 - d_0^2) + (n \pm \Delta n \pm \Delta_4)(d - d_0) + P_m + \delta. \end{cases} \quad (2)$$

де P_m – вимірювальне значення потужності сигналу на вході приймача, яке також можна визначити як середньостатистичне значення на базі виразу:

$$P_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{np,i}, \quad (3)$$

де $P_{np,i}$ – потужність що прив'язана до циклу моніторингу; n – кількість циклів вимірювань для отримання відповідної достовірності оцінювання. $\Delta a, \Delta b, \Delta k, \Delta n$ – відповідні інтервали флуктуацій коефіцієнтів затухання сигналу. $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$ – додаткові інтервали флуктуацій що залежать від факторів в різних приміщеннях

Вираз (2) враховує існування всіх факторів впливу у приміщенні, під час оцінювання покриття

корпоративних мереж стандарту Wi-Fi, а також дає можливість встановлювати дію динамічних факторів впливу що виникають при використанні випадково-конфігурованих безпроводних каналів стандарту Wi-Fi в різних умовах, безпосередньо з точки зору абонента.

Висновки. Таким чином, на основі проведених досліджень корпоративних телекомунікаційних мереж стандарту Wi-Fi встановлено, що в більшості випадків, вплив фактору просторового рознесення мереж та випадково-конфігурованого обладнання можна охарактеризувати, як середньостатистичну подібність функціонування в умовах дії різного роду факторів впливу, незалежно від розташування. Підтверджено, що оптимальною функцією оцінювання поширення сигналу у приміщенні є квадратичне затухання за координатами довжини та ширини приміщення для кутового та центрального положень точки доступу незалежно від частотного діапазону. Встановлено, що ефективність оцінювання покриття корпоративних мереж стандарту Wi-Fi залежить від встановлення меж інтервалів флуктуацій сигналу, що дає можливість врахувати будь-які зміни параметрів середовища передачі в режимі реального часу. Вдосконалено узагальнену модель оцінювання покриття корпоративних мереж стандарту Wi-Fi на базі статистичного аналізу експериментальних досліджень із врахуванням фактору використання випадково-конфігурованого обладнання в різноманітних умовах приміщень.

Список літератури:

1. Zhurakovskiy B., Boyko J., Druzhynin V., Zeniv I., Eromenko O. Increasing the efficiency of information transmission in communication channels. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2020. №19 (3). Pp. 1306–1315, DOI: 10.11591/ijeecs.v19.i3.pp1306-1315.
2. Mykhalevskiy D. Devising a technique to evaluate fluctuations in the main parameters of a wireless channel of the 802.11 standard. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. №6/9 (108). Pp. 18–24. DOI: 10.15587/1729–4061.2020.218720.
3. Mykhalevskiy D. Development of a spartial method for the estimation of signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. №4/9 (88). Pp. 29–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.106925.
4. Yang H. Reliable RSS Indoor Location Systems Based on Signal Distribution. *SSRG International Journal of Industrial Engineering*. 2024. №11 (3). Pp. 1-4. DOI: 10.14445/23499362/IJIE-V11I3P102.
5. Mykhalevskiy D., Vasyukivskiy N., Horodetska O. Development of a mathematical model for estimating signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. №4/9 (88). Pp. 38–43. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191.
6. Haider Z., Saleem M., Jamal T. Analysis of Interference in Wireless Networks. arXiv:1810.13164v1. 2018. Pp. 1-9. DOI: 10.48550/arXiv.1810.13164
7. Mykhalevskiy D. Construction of mathematical models for the estimation of signal strength at the input to the 802.11 standard receiver in a 5 GHz band. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. №6/9 (96). Pp. 16–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.150983.
8. Михалевський Д.В. Дослідження факторів впливу на оцінювання основних параметрів безпроводних каналів стандарту 802.11. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. №6. С. 107–114. DOI: 10.31649/1997-9266-2020-153-6-107-114.

9. Михалевський Д.В. Аналіз параметрів сигналу у каналах стандарту 802.11g при спектральних завадах. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conf. "MSATPA"* (Oct. 20-22) 2014 Dubai. 2014. Pp. 33-37.
10. Hussain S., Bhadri N., Hussain S. Advancements in Wireless Communication. *International Journal of Electronics and Communication*. 2020. № 7(9). Pp 1-4. DOI: 10.14445/23488549/IJECE-V7I9P101.
11. Zhang X., Chu F. Multimedia Real-Time Transmission Protocol and Its Application in Video Transmission System. *Comput Intell Neurosci*. 2022 May 23;2022:8654756. DOI: 10.1155/2022/8654756.
12. Mykhalevskiy D. Investigation of Sensitivity Impact of Receiver to Effective Data Transmission Rate. *Proceeding of the 1th IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing. Conference Proceeding*. August 23–27, 2016, Lviv, Ukraine. Pp. 369-372.

Mykhalevskiy D.V., Makogon V. I., Entin I.I. ASSESMENT OF COVERAGE OF CORPORATE WIRELESS NETWORKS OF THE WI-FI STANDARD IN THE ROOM

In this paper, studies random patterns associated with the action of random spatially distributed influence factors for corporate Wi-Fi networks. The results of experimental studies of signal coverage in rooms for corner and central positions of the access point, obtained using monitoring algorithms, are presented. Based on the data obtained, statistical studies were conducted and an average statistical model for assessing coverage was proposed, considering the action of dynamic influence factors based on fluctuation intervals. For the studies, conditions were created for the existence of wireless channels with a random configuration in different types of rooms and the corresponding number of influence factors, and the factor of spatial diversity of networks and independent monitoring periods was considered.

Established that regardless of the frequency range used, the average statistical value of the level of signal power fluctuation at the receiver input was ± 2.5 dBm for rooms with a small occupancy. When the room is filled with objects by more than 25%, which creates additional reflecting surfaces, fluctuations near architectural obstacles increase to ± 5 dBm. In the presence of brick or concrete structures, fluctuations increase to $\delta = \pm 10$ dBm behind them. The network frequency range makes almost no changes to signal power fluctuations. In addition, the central position of the access point makes it possible to clearly determine internal architectural obstacles and the level of fluctuations behind them. This gives grounds to assert the average statistical similarity of the functioning of Wi-Fi standard networks under the influence of various types of influencing factors, regardless of location.

A generalized model for assessing the coverage of corporate Wi-Fi standard networks has been improved based on statistical analysis of experimental studies, which considers the existence of all influencing factors in the room, as well as the factor of spatial separation of networks and independent monitoring periods in different conditions.

Key words: *assessment, wireless channels, experimental model, corporate telecommunications network, architectural obstacles, statistical analysis.*

Дата надходження статті: 29.08.2025

Дата прийняття статті: 15.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025