

**ОБЕЛЪОВСЬКА Квітослава**

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0000-0002-8714-460X>e-mail: [kvitoslava.m.obelovska@lpnu.ua](mailto:kvitoslava.m.obelovska@lpnu.ua)**ПЕЛЕХ Христина**

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0000-0002-9554-0493>e-mail: [khrystyna.pelekh.mknus.2021@lpnu.ua](mailto:khrystyna.pelekh.mknus.2021@lpnu.ua)**ПЕЛЕХ Юрій**

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0000-0003-4153-5418>e-mail: [yurii.m.pelekh@lpnu.ua](mailto:yurii.m.pelekh@lpnu.ua)**СНАЙЧУК Яромір**

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0000-0002-9403-824X>e-mail: [yaromyr.l.snaichuk@lpnu.ua](mailto:yaromyr.l.snaichuk@lpnu.ua)

## АНАЛІЗ СХЕМИ CSMA/CA БЕЗПРОВІДНИХ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ

Ефективність бездротових локальних мереж значною мірою залежить від способу доступу до спільного фізичного середовища. Основним методом доступу, що використовується для розподілу фізичного середовища між активними станціями, є множинний доступ з прослуховуванням несучої та запобіганням колізій (CSMA/CA). Для опису схеми CSMA/CA використано запропоновану спрощену діаграму переходів станів станції безпроводної локальної мережі, описано її системою диференціальних рівнянь та отримано аналітичні вирази для оцінки ймовірностей перебування станції мережі у всіх можливих станах.

**Ключові слова:** безпроводна локальна мережа, множинний доступ із прослуховуванням несучої та запобіганням колізій (CSMA/CA), діаграма переходів станів.

OBELOVSKA Kvitoslava, PELEKH Khrystyna, PELEKH Yury. SNAICHUK Yaromir  
Lviv Polytechnic National University

## ANALYSIS OF THE CSMA/CA SCHEME FOR WIRELESS LOCAL AREA NETWORKS

The current stage of telecommunication technologies development is characterized by the rapid growth use of wireless technologies in access networks and the growth requirements for its quality. The bottleneck that significantly reduces the bandwidth of each subscriber connection is that the total bandwidth of the wireless local network is shared among its active members by the shared technology used. The access management sub-layer to the shared physical environment is responsible for this in the network architecture. The main method used at this sub-layer is the Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) scheme. This work is devoted to the analysis of CSMA/CA scheme and the development of an analytical model for its further study and use for the improvement of wireless local networks. The input data is a transition state diagram of a local area wireless network station in data transmission mode. According to the CSMA/CA scheme, stations cannot change their state after starting frame transmission until a confirmation frame of successful reception arrives from the addressee or until the time to wait for it expires. Considering this, it is proposed to use a simplified transition state diagram for the analysis. The operation of the station by the simplified transition state diagram is described using a system of differential equations. As a result of the solution of this system, expressions representing the probability of the station being in each of its states as a function of the intensities of the station's transitions from each state to another are derived. The values of these intensities depend on both the outgoing traffic of the station and the traffic in the network. The resulting expressions can be used in further work on the analysis of the CSMA/CA scheme, as they make it possible to estimate the operation of the station at different ratios of the station's output traffic and external traffic generated by other stations of the network. This can be used to develop an enhanced algorithm station operation of wireless local area networks by adapting the parameters of the CSMA/CA scheme to specific current loads of both the station and the network.

**Keywords:** Wireless Local Area Network, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA), State Transition Diagram.

### Постановка проблеми

Одним з важливих завдань щодо вдосконалення безпроводного зв'язку є підвищення ефективності безпроводних локальних мереж і забезпечення ними потрібної якості сервісу. Безпроводний зв'язок швидко розвивається, і на даному етапі можна відзначити значні успіхи у зростанні швидкості передачі на фізичному рівні мережевої архітектури. Однак фізичне середовище безпроводної локальної мережі є загальним для всіх її вузлів, а спеціальні методи організації доступу станцій до загального середовища ділять це середовище між активними станціями і вимагають використання певних значних ресурсів, в тому числі, і часових. У результаті навіть із використанням найефективніших технологій фізичного рівня ефективність використання безпроводних каналів бажає бути кращою. Тому аналіз і вдосконалення одного з вузьких місць безпроводних локальних мереж, підрівня управління доступом до спільного фізичного середовища (Media Access Control Sublayer, MAC-sublayer), який відповідає за доступ станцій до спільного середовища, є актуальним і важливим завданням.

### Аналіз останніх досліджень

Сучасна тенденція розвитку телекомунікаційних технологій спрямована на збільшення використання бездротового зв'язку та підвищення вимог до його якості. Однією з головних проблем

безпроводного зв'язку є розподіл ресурсів спільного фізичного середовища між активними учасниками. В мобільних мережах 5G актуальним напрямком досліджень на сьогодні є аналіз і оптимізація розподілу ресурсів для передачі різних типів трафіку [1, 2], в локальних – аналіз і вдосконалення методів доступу до фізичного середовища [3]. Існує кілька категорій доступу до спільного фізичного середовища, серед яких найчастіше використовується метод на основі конкуренції. Конкурентний метод доступу використовують такі відомі стандарти, як IEEE 802.11 для безпроводних локальних мереж (Wireless Local Area Network, WLAN) [4] та IEEE 802.15.4 для низькошвидкісних безпроводних персональних мереж (Low-Rate Wireless Personal Area Network, LR-WPAN) [5]. Метод доступу, що описується в цих стандартах, реалізовано як множинний доступ із прослуховуванням несучої та запобіганням колізій (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA).

Існує багато робіт, присвячених вивченню та вдосконаленню методів доступу до фізичного середовища, в тому числі CSMA/CA. Одні з них відносяться до безпроводних локальних мереж [6, 7], інші до безпроводних сенсорних LR-WPAN, як, наприклад, робота [8].

В [8] автори з метою підвищення продуктивності неслотового CSMA/CA пропонують модифікований неслововий CSMA/CA, який розділяє затримку відтермінування (Backoff) на дві складові: основну та додаткову. Аналіз модифікованого CSMA/CA здійснено з використанням моделі Маркова, отримано вирази для оцінки середньої затримки, споживання енергії та надійності. Пакет моделювання OPNET був застосований для перевірки запропонованої моделі Маркова та порівняння модифікованого методу зі стандартним. Результати демонструють, що модифікований CSMA покращує надійність, одночасно зменшуючи середню затримку.

Статті [6, 7] можуть бути прикладом з вдосконалення схеми CSMA/CA для безпроводних локальних мереж та ілюстрацією використання для цих цілей машинного навчання. Для збільшення продуктивності протоколу CSMA/CA MAC-підрівня використовується підкріплене навчання, за допомогою якого оптимізується значення вікна конкуренції шляхом пристосування до трафіку в безпроводній локальній мережі. В результаті запропонована схема доступу має вищу пропускну здатність, ніж існуюча схема CSMA/CA.

Стаття [9] пропонує модифіковану схему CSMA/CA, яка забезпечує координацію каналів між різнорідними безпроводними технологіями. Як технології WLAN і WPAN використовуються мережі Wi-Fi (IEEE 802.11) і Zigbee (IEEE 802.15.4). Важливим позитивним аспектом є те, що запропонований метод не потребує модифікації апаратного забезпечення та стандартів ні для WLAN, ні для WPAN.

Для дослідження MAC-підрівня використовують різні математичні апарати, наприклад, марківські процеси [2, 8], машинне навчання [6, 7], аналітичне та імітаційне моделювання [1–3, 7, 8]. Використовують як власні розроблені програми [3], так і спеціальний інструментарій, такий як Network Simulator, OMNET+, OPNET, Graphical Network Simulator, Matlab/Simulink, Maple, CISCO Packet Tracer та інші.

Основні режими функціонування безпроводних локальних мереж на MAC-підрівні описано у роботі [4]. В [10] представлено опис роботи станції безпроводної локальної мережі та наведена діаграма переходів між її станами, що використана в [11] для подальшого аналізу. В [11] робота станції WLAN описана системою диференціальних рівнянь, а результатом є отримані аналітичні вирази, що дозволяють оцінити ймовірність перебування станції WLAN в кожному з її можливих станів в залежності від інтенсивностей переходів між станами. За схемою CSMA/CA станції не можуть змінювати свій стан після початку передачі кадру до тих пір, поки від адресата не прийде кадр підтвердження успішного прийому або поки не закінчиться час його очікування. Враховуючи це, метою даної роботи є модифікація діаграми станів з метою її спрощення та розробка моделі для її опису.

#### Виклад основного матеріалу

Діаграма переходу станів методу CSMA/CA безпроводної станції при організації передачі кадру включає в себе наступну сукупність станів [10]: холостий стан (idle state), стан прослуховування без відтермінування (non-Backoff carrier sensing state), стан замороження Backoff (Backoff state), стан колізії (collision state), стан успішної передачі (successful transmit state), стан очікування підтвердження або отримання негативної квитанції NAK (wait for acknowledge or receive NAK state) і стан отримання кадру-квитанції ACK (receive ACK acknowledge state).

Оскільки станція після успішної передачі за замовчуванням мусить очікувати поки від адресата не прийде кадр підтвердження успішного прийому ACK і тільки тоді переходити до наступних дій, то з метою спрощення моделі доцільним є об'єднати стан успішної передачі та стан отримання кадру-квитанції ACK в один – стан успішної передачі та отримання квитанції ACK. На рисунку 1 представлена діаграма переходів станів, що реалізує це спрощення.

Діаграма переходів станів CSMA/CA має 6 станів:

- 1 – холостий стан;
- 2 – стан прослуховування каналу;
- 3 – стан замороження Backoff;
- 4 – стан колізії;
- 5 – стан очікування підтвердження або отримання NAK;
- 6 – стан успішної передачі та отримання квитанції ACK.

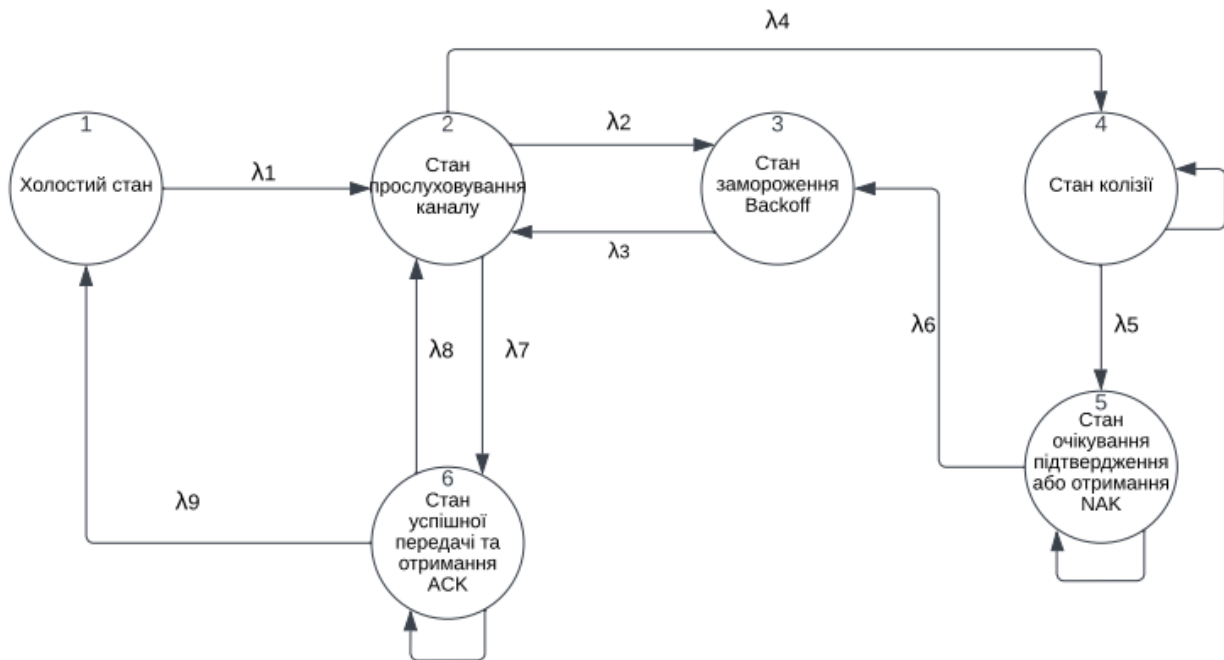


Рис. 1. Діаграма переходів станів для схеми CSMA/CA

Позначимо через  $\lambda$  інтенсивність переходу станції на каналному рівні архітектури з одного стану в інший. Тоді у відповідності з рисунком 1:

- $\lambda_1$  – інтенсивність переходу станції із холостого стану у стан прослуховування каналу;
- $\lambda_2$  – інтенсивність переходу станції із стану прослуховування каналу у стан замороження Backoff;
- $\lambda_3$  – інтенсивність переходу станції зі стану замороження Backoff у стан прослуховування;
- $\lambda_4$  – інтенсивність переходу станції із стану прослуховування каналу у стан колізії;
- $\lambda_5$  – інтенсивність переходу станції зі стану колізії у стан очікування підтвердження або отримання NAK;
- $\lambda_6$  – інтенсивність переходу станції зі стану очікування підтвердження або отримання NAK у стан замороження Backoff;
- $\lambda_7$  – інтенсивність переходу станції зі стану прослуховування каналу у стан успішної передачі та отримання АСК;
- $\lambda_8$  – інтенсивність переходу станції зі стану успішної передачі та отримання квитанції АСК у стан прослуховування каналу;
- $\lambda_9$  – інтенсивність переходу станції зі стану успішної передачі та отримання квитанції АСК у холостий стан.

У випадку, коли система описується випадковим процесом, який характеризується дискретними станами і неперервним часом, то її математичною моделлю буде система диференціальних рівнянь [11]. Для приведеного на рис. 1 графа система може бути записана наступним чином:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_1 P_1(t) + \lambda_9 P_6(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= -\lambda_2 P_2(t) - \lambda_4 P_2(t) - \lambda_7 P_2(t) + \lambda_3 P_3(t) + \lambda_1 P_1(t) + \lambda_8 P_6(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= -\lambda_3 P_3(t) + \lambda_2 P_2(t) + \lambda_6 P_5(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} &= -\lambda_5 P_4(t) + \lambda_4 P_2(t) \\ \frac{dP_5(t)}{dt} &= -\lambda_6 P_5(t) + \lambda_5 P_4(t) \\ \frac{dP_6(t)}{dt} &= -\lambda_8 P_6(t) - \lambda_9 P_6(t) + \lambda_7 P_2(t) \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Для дослідження роботи станції в стаціонарному режимі систему рівнянь (1) можна переписати у вигляді системи алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda_1 p_1 + \lambda_9 p_6 \\ 0 = -\lambda_2 p_2 - \lambda_4 p_2 - \lambda_7 p_2 + \lambda_3 p_3 + \lambda_1 p_1 + \lambda_8 p_6 \\ 0 = -\lambda_3 p_3 + \lambda_2 p_2 + \lambda_6 p_5 \\ 0 = -\lambda_5 p_4 + \lambda_4 p_2 \\ 0 = -\lambda_6 p_5 + \lambda_5 p_4 \\ 0 = -\lambda_8 p_6 - \lambda_9 p_6 + \lambda_7 p_2 \end{cases} \quad (2)$$

Загальна ймовірність того, що система перебуває в будь-якому з дискретних станів, дорівнює 1, що дає тотожність нормалізації.

$$\sum_{k=1}^6 p_k = 1 \quad (3)$$

Для розв'язку системи використаємо метод підстановок і представимо всі ймовірності через ймовірність  $p_1$ .

З першого рівняння системи (2) виведено ймовірність перебування станції у шостому стані через ймовірність  $p_1$ :

$$p_6 = \frac{\lambda_1}{\lambda_9} p_1 \quad (4)$$

З шостого рівняння системи (2) з врахуванням рівняння (4):

$$p_2 = \frac{\lambda_8 + \lambda_9}{\lambda_7} p_6 = \frac{\lambda_8 + \lambda_9}{\lambda_7} \frac{\lambda_1}{\lambda_9} p_1 \quad (5)$$

З четвертого рівняння системи (2) з врахуванням рівняння (5) отримаємо ймовірність перебування у четвертому стані:

$$p_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_5} p_2 = \frac{\lambda_4}{\lambda_5} \frac{\lambda_8 + \lambda_9}{\lambda_7} \frac{\lambda_1}{\lambda_9} p_1 \quad (6)$$

З п'ятого рівняння системи (2) з врахуванням рівняння (6) отримуємо ймовірність перебування у п'ятому стані:

$$p_5 = \frac{\lambda_5}{\lambda_6} p_4 = \frac{\lambda_5}{\lambda_6} \frac{\lambda_4}{\lambda_5} \frac{\lambda_8 + \lambda_9}{\lambda_7} \frac{\lambda_1}{\lambda_9} p_1 = \frac{\lambda_4}{\lambda_6} \frac{\lambda_8 + \lambda_9}{\lambda_7} \frac{\lambda_1}{\lambda_9} p_1 \quad (7)$$

З третього рівняння системи (2) з врахуванням рівняння (7):

$$p_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_3} p_2 + \frac{\lambda_6}{\lambda_3} p_5 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (\lambda_8 + \lambda_9)}{\lambda_3 \lambda_7 \lambda_9} p_1 + \frac{\lambda_1 \lambda_4 (\lambda_8 + \lambda_9)}{\lambda_3 \lambda_7 \lambda_9} p_1 = \frac{\lambda_1 (\lambda_2 + \lambda_4) (\lambda_8 + \lambda_9)}{\lambda_3 \lambda_7 \lambda_9} p_1 \quad (8)$$

Підставимо (4) - (8) в (3) і представимо загальну ймовірність перебування системи у будь-якому із шести станів:

$$p_1 + \frac{\lambda_8 + \lambda_9}{\lambda_7} \frac{\lambda_1}{\lambda_9} p_1 + \frac{\lambda_1 (\lambda_2 + \lambda_4) (\lambda_8 + \lambda_9)}{\lambda_3 \lambda_7 \lambda_9} p_1 + \frac{\lambda_4}{\lambda_5} \frac{\lambda_8 + \lambda_9}{\lambda_7} \frac{\lambda_1}{\lambda_9} p_1 + \frac{\lambda_4}{\lambda_6} \frac{\lambda_8 + \lambda_9}{\lambda_7} \frac{\lambda_1}{\lambda_9} p_1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_9} p_1 = 1 \quad (9)$$

$$p_1 = 1 / \left( 1 + \frac{\lambda_8 + \lambda_9}{\lambda_7} \frac{\lambda_1}{\lambda_9} + \frac{\lambda_1 (\lambda_2 + \lambda_4) (\lambda_8 + \lambda_9)}{\lambda_3 \lambda_7 \lambda_9} + \frac{\lambda_4}{\lambda_5} \frac{\lambda_8 + \lambda_9}{\lambda_7} \frac{\lambda_1}{\lambda_9} + \frac{\lambda_4}{\lambda_6} \frac{\lambda_8 + \lambda_9}{\lambda_7} \frac{\lambda_1}{\lambda_9} + \frac{\lambda_1}{\lambda_9} \right) \quad (10)$$

Для спрощення введемо позначення:

$$B = \left( 1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_9} \left[ 1 + \frac{\lambda_8 + \lambda_9}{\lambda_7} \left( 1 + \frac{\lambda_2 + \lambda_4}{\lambda_3} + \frac{\lambda_4}{\lambda_5} + \frac{\lambda_4}{\lambda_6} \right) \right] \right)^{-1} \quad (11)$$

Таким чином, стаціонарні ймовірності  $p_i$  визначаються за формулами:

- ймовірність перебування станції у холостому стані:

$$p_1 = B \quad (12)$$

- ймовірність перебування станції у стані прослуховування каналу:

$$p_2 = \frac{\lambda_8 + \lambda_9}{\lambda_7} \frac{\lambda_1}{\lambda_9} B \quad (13)$$

- ймовірність перебування станції у стані замороження Vascoff:

$$p_3 = \frac{\lambda_1 (\lambda_2 + \lambda_4) (\lambda_8 + \lambda_9)}{\lambda_3 \lambda_7 \lambda_9} B \quad (14)$$

- ймовірність перебування станції у стані колізії:

$$p_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_5} \frac{\lambda_8 + \lambda_9}{\lambda_7} \frac{\lambda_1}{\lambda_9} B \quad (15)$$

- ймовірність перебування станції у стані очікування підтвердження або отримання НАК:

$$p_5 = \frac{\lambda_4}{\lambda_6} \frac{\lambda_8 + \lambda_9}{\lambda_7} \frac{\lambda_1}{\lambda_9} B \quad (16)$$

- ймовірність перебування станції у стані успішної передачі та отримання квитанції АСК:

$$p_6 = \frac{\lambda_1}{\lambda_9} B \quad (17)$$

Отримані аналітичні вирази (12)–(17) дають змогу оцінити ймовірність перебування станції WLAN в кожному з її можливих станів залежно від інтенсивностей переходів між станами.

### Висновки

Станція бездротової локальної мережі розглядається як стохастична система, умови роботи якої та характеристики її станів залежать від багатьох випадкових факторів. Опис роботи станції базується на діаграмі переходів станів для множинного доступу з прослуховуванням несучої та запобіганням колізій.

Запропоновано спрощену діаграму переходів станів методу CSMA/CA при роботі станції безпроводної локальної мережі в режимі передачі. Роботу станції описано за допомогою системи диференціальних рівнянь, у результаті розв'язку якої отримано аналітичні вирази для ймовірностей перебування станції в усіх станах. Отримані формули можуть бути використані при подальшому аналізі та вдосконаленні схеми CSMA/CA.

### References

1. Kovtun V., Izonin I., Gregus M. (2022). Modeling a session of subject-system interaction in a wireless communication infrastructure with a mixed resource. *PLoS ONE* 17(7): e0271536. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271536>
2. Viacheslav Kovtun, Ivan Izonin, Michal Gregus. Model of functioning of the centralized wireless information ecosystem focused on multimedia streaming. *Egyptian Informatics Journal*. 2022. (in press). <https://doi.org/10.1016/j.eij.2022.06.009>
3. Olga Panova, Kvitoslava Obelovska. An Adaptive ACs Number Adjusting Algorithm for IEEE 802.11 EDCA. *Proceedings of the 8-th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*. September 24-26, 2015, Warsaw, Poland. IEEE Catalog Number: CF11803-PRT, 2015, vol. 2, pp. 823–856, 2015.
4. National Instrument, Introduction to Wireless LAN Measurements: From 802.11a to 802.11ac. 2014. URL: [http://download.ni.com/evaluation/rf/Introduction\\_to\\_WLAN\\_Testing.pdf](http://download.ni.com/evaluation/rf/Introduction_to_WLAN_Testing.pdf) (accessed on 18 February 2022).
5. IEEE Standard 802.15.4Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), IEEE: Manhattan, NY, USA, 2006.
6. Kim T.-W., Hwang G.-H. (2021). Performance Enhancement of CSMA/CA MAC Protocol Based on Reinforcement Learning. *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*, 19(1), 1–7. <https://doi.org/10.6109/JICCE.2021.19.1.1>
7. Cruz S.C.D.S., Ahmed Ouameur M. Figueiredo F.A.P.D. Reinforcement Learning-based Wi-Fi Contention Window Optimization. *Preprints 2022*, 2022110011. doi: 10.20944/preprints202211.0011.v1.
8. Mahmoud Gamal, Nayera Sadek, Mohamed R.M. Rizk, Magdy Abd ElAzim Ahmed. Optimization and modeling of modified unslotted CSMA/CA for wireless sensor networks. *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, issue 2, 2020, p. 681-691, ISSN 1110-0168, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.035>
9. Kim S. Enabling WLAN and WPAN Coexistence via Cross-Technology Communication. *Sensors* 2022, 22, 707. <https://doi.org/10.3390/s22030707>
10. Khattab T.M.S., El-Hadidi M.T., Mourad H-A.M. Analysis of Wireless CSMA/CA Network Using Single Station Superposition (SSS). *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 56/2, pp. 73–83 (2002).
11. Auzinger W., Obelovska K., Dronyuk I., Pelekh K., Stolyarchuk R.A. Continuous Model for States in CSMA/CA-Based Wireless Local Networks Derived from State Transition Diagrams. In Saraswat M., Roy S., Chowdhury C., Gandomi A.H. (eds) *Proceedings of International Conference on Data Science and Applications*. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 287. Springer, Singapore. (2022).