

Математическое моделирование  
Mathematical modeling

УДК 519.95:621.3  
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-67-76>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Исследование вероятностно-временных характеристик беспроводных сетей с методом доступа CSMA/CA

А.С. Леонтьев,  
Д.В. Жматов<sup>@</sup>

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия  
<sup>@</sup> Автор для переписки, e-mail: [zhamatov@mirea.ru](mailto:zhamatov@mirea.ru)

### Резюме

**Цели.** Целью статьи является разработка аналитических методов оценки вероятностно-временных характеристик и производительности беспроводных сетей с методом доступа CSMA/CA, позволяющих автоматизировать процессы выбора рациональных режимов работы и снизить влияние наложений в сетях, реализующих протоколы 802.11.

**Методы.** Используются методы теории надежности, теории случайных процессов и теории массового обслуживания, преобразование Лапласа – Стильтеса.

**Результаты.** Разработан аналитический метод оценки вероятностно-временных характеристик и производительности беспроводных сетей с методом доступа CSMA/CA с учетом ограничений на время передачи информации. Метод расширяет область применимости аналитических подходов, предложенных ранее для исследования локальных сетей Ethernet. Проведен анализ сетей, которые используют метод доступа CSMA/CA. Разработана оригинальная математическая модель, позволяющая оценить различные характеристики процессов передачи пакетов в беспроводных сетях при ограничениях на время передачи. Эти характеристики включают время ожидания, время передачи пакетов, загрузку узлов и производительность сети. Для упрощения анализа и оценки различных режимов работы беспроводных сетей с методом доступа CSMA/CA был разработан программный комплекс.

**Выводы.** Показана необходимость первоочередной разработки вложенных аналитических моделей, описывающих процессы передачи пакетов в беспроводных сетях при ограничениях на время передачи информации на канальном уровне. Это означает, что для более точного описания процессов передачи пакетов в таких сетях требуется создание более сложных моделей. Разработанный программный комплекс позволяет изучать различные варианты функционирования сети и проводить аналитические расчеты. Были проведены расчеты для оценки вероятностно-временных характеристик процессов передачи пакетов и производительности беспроводной сети. Исследования включали изменение количества рабочих станций и интенсивности потоков пакетов, поступающих в узлы сети, при ограничении времени передачи пакетов. Применение разработанных математических моделей может быть полезным при создании и оптимизации беспроводных сетей, таких как Wi-Fi-сети, сети связи на основе стандарта IEEE 802.11 и другие системы передачи данных с использованием метода доступа CSMA/CA. Такие модели и анализ на их основе различных режимов функционирования беспроводных сетей могут помочь в оптимизации производительности сетей, настройке параметров, а также при выборе емкости и конфигурации беспроводных сетей.

**Ключевые слова:** аналитический метод, математическая модель, беспроводные сети, jam-пакеты, CSMA/CA, стандарт 802.11, временные характеристики

• Поступила: 29.06.2023 • Доработана: 10.10.2023 • Принята к опубликованию: 12.02.2024

**Для цитирования:** Леонтьев А.С., Жматов Д.В. Исследование вероятностно-временных характеристик беспроводных сетей с методом доступа CSMA/CA. *Russ. Technol. J.* 2024;12(2):67–76. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-67-76>

**Прозрачность финансовой деятельности:** Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Study of the probabilistic and temporal characteristics of wireless networks using the CSMA/CA access method

Alexander S. Leontyev,  
Dmitry V. Zhmatov<sup>@</sup>

*MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia*

<sup>@</sup> *Corresponding author, e-mail: zhmatov@mirea.ru*

### Abstract

**Objectives.** The aim of this study is to develop analytical methods to evaluate the probabilistic and temporal characteristics and performance of wireless networks using the CSMA/CA access method. These methods enable the process of selecting rational operating modes to be automated and the impact of collisions in networks implementing the 802.11 protocols to be reduced.

**Methods.** The methods employed herein include reliability theory, theory of random processes, queuing theory, and the Laplace–Stieltjes transform.

**Results.** A problem statement is presented and developed, along with an analytical method for evaluating the probabilistic and temporal characteristics and performance of wireless networks using the CSMA/CA access method. This method considers time constraints on information transmission, thus expanding the applicability of previously proposed analytical approaches for studying Ethernet local area networks. The analysis of networks that use the CSMA/CA access method was carried out. An original mathematical model was developed that allows evaluating various characteristics of packet transmission processes in wireless networks under time constraints on the transmission. These characteristics include latency, packet transfer time, node load, and network performance. A software package was developed to simplify the analysis and evaluation of various operation modes of wireless networks using the CSMA/CA access method.

**Conclusions.** We demonstrate the need for developing nested analytical models describing packet transmission processes in wireless networks under time constraints on link-layer transmission. This implies the development of more complex models for more exact description of packet transmission processes in such networks. The software package developed herein enables the various options for the functioning of the network to be studied and analytical calculations to be performed. Calculations were carried out, in order to assess the probabilistic and temporal characteristics of packet transmission processes and the wireless network performance. The research involved varying the number of workstations and the intensity of packet flows entering the network nodes under the time constraint on packet transmission. The application of the developed mathematical models will be useful in creating and optimizing wireless networks such as Wi-Fi networks, networks based on the IEEE 802.11 standard, and other data transmission systems using the CSMA/CA access method. Such models and the analysis based on them will be useful in optimizing network performance, adjusting parameters, as well as selecting the capacity and configuration of wireless networks.

**Keywords:** analytical method, mathematical model, wireless networks, jam packets, CSMA/CA, 802.11 standard, temporal characteristics

• Submitted: 29.06.2023 • Revised: 10.10.2023 • Accepted: 12.02.2024

**For citation:** Leontyev A.S., Zhmatov D.V. Study of the probabilistic and temporal characteristics of wireless networks using the CSMA/CA access method. *Russ. Technol. J.* 2024;12(2):67–76. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-67-76>

**Financial disclosure:** The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Поиск новых способов повышения производительности беспроводной локальной сети (wireless local area network, WLAN) вызван резким увеличением количества устройств с поддержкой Wi-Fi и интенсивным растущим спросом.

Для качественной передачи потоковой информации WLAN использует общую физическую среду для обмена данными между активными устройствами. Одной из важных проблем WLAN является контроль доступа к физической среде. В наиболее распространенных беспроводных сетях Wi-Fi станция доступа к среде использует множественный доступ с предотвращением коллизий (carrier sensing multiple access with collision avoidance, CSMA/CA). Использование части пропускной способности сети для реализации CSMA/CA уменьшает пропускную способность сети для передачи абонентского трафика, что негативно влияет на производительность беспроводной сети

Методы доступа к физической среде беспроводных компьютерных сетей играют важную роль в функционировании подуровня управления доступом к среде. Доступ к физической среде WLAN регулируется стандартом IEEE 802.11<sup>1</sup>. Наиболее широко используется протокол MAC-адресации (media access control), который основан на схеме CSMA/CA. Эта схема обеспечивает конкурентный доступ к физической среде.

В ранних версиях IEEE 802.11 механизм CSMA/CA был реализован как функция распределенной координации и обеспечивал равный доступ для всех узлов в сети.

Кроме того, в сетях, ориентированных на точки доступа, стандарт IEEE 802.11 реализует функцию координации точек, которая обеспечивает централизованный доступ к физической среде. Функция распределенной координации не поддерживает качество услуг (quality of service, QoS).

Как правило, кадры с более высоким приоритетом имеют больше шансов быть переданными, а нагрузка на канал снижается. Многие исследовательские

<sup>1</sup> IEEE 802.11 – набор стандартов связи для коммуникации в беспроводной локальной сетевой зоне частотных диапазонов 2.4, 3.6 и 5 ГГц. [IEEE 802.11 is a set of communication standards for communication in the wireless local area networking frequency bands of 2.4, 3.6, and 5 GHz.]

работы направлены на улучшение производительности подуровня MAC с помощью различных методов и подходов. При этом большинство из них ориентировано на обеспечение передачи различных типов трафика, однако влияние различных соотношений типов трафика на производительность сети еще не изучалось. Знание этого даст возможность разработать специализированные алгоритмы для улучшения передачи информации в беспроводных сетях.

Подуровень MAC ориентирован на определенные соотношения типов трафика в каждом конкретном приложении.

Разработка математических методов оценки загрузки узлов, передающей среды, временных характеристик и производительности локальных и беспроводных сетей позволяет автоматизировать процесс проектирования [1, 2], в результате чего эффективность сети может быть повышена. Современные сетевые технологии и протоколы описаны в работах [3, 4].

К основным методам исследования многомашиных вычислительных систем и локальных сетей относятся методы теории надежности [5–7], методы теории массового обслуживания и имитационного моделирования [8–15]. Известные аналитические методы исследования не учитывают директивные ограничения на время передачи пакетов в беспроводных сетях. Для метода доступа CSMA/CA должны быть выдержаны определенные соотношения параметров «скорость передачи / размер кадра» и «размер сети / размер кадра».

В работе представлена оригинальная аналитическая модель оценки вероятностно-временных характеристик и производительности беспроводных сетей с методом доступа CSMA/CA при директивных ограничениях на время передачи информации, развивающая известные аналитические методы исследования Ethernet-сетей [16].

## 1. ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДА ДОСТУПА CSMA/CA

В беспроводной среде вероятность ошибки передачи данных гораздо выше, чем в проводной, а мощность сигнала, который передается, гораздо больше мощности сигнала, который принимается. Диапазон работы передатчиков в этом случае ограничен, поэтому не все компьютеры в сети Wi-Fi могут принимать

передаваемые данные. Это приводит к ряду проблем, наиболее известные из которых – это проблемы скрытой и засвеченной станций [11, 12]. В сети Ethernet используется метод доступа CSMA/CD – случайный множественный метод доступа с контролем несущей и обнаружением конфликтов (carrier-sense multiple access with collision detection), поскольку конфликты обходятся сравнительно дешево, они обнаруживаются почти сразу, и при этом компьютеры сразу останавливают передачу [4]. В беспроводных сетях Wi-Fi, т.к. коллизии обходятся очень дорого, используется метод доступа CSMA/CA – случайный множественный метод доступа с контролем несущей и предотвращением конфликтов [9, 10]. В работах [11, 12] рассмотрены современные технологии передачи данных и перспективы их развития.

Метод доступа CSMA/CA чаще всего используется в беспроводных сетях, работа которых на физическом уровне описывается моделью ISO/OSI (International Organization for Standardization / Open Systems Interconnection model) и стандартом 802.11. В частности, в высокоскоростных Wi-Fi-сетях используются стандарты связи IEEE 802.11x, 802.11ac, 802.11ax и 802.11be [16]. Метод CSMA/CA показывает высокую эффективность в компактных беспроводных сетях с небольшим числом узлов.

С увеличением количества рабочих станций и нагрузки на них наблюдается резкое снижение эффективности беспроводной сети. Эти два фактора неизбежно увеличивают количество конфликтов и приводят к тому, что на их решение тратится больше времени. Отметим, что, в отличие от методов исследования кабельных или оптоволоконных локальных сетей [16], аналитические методы исследования вероятностно-временных характеристик беспроводных сетей недостаточно развиты. Разработка моделей на основе методов имитационного моделирования [13, 14] очень трудоемка и требует много времени для достижения надежных результатов во всей области исследования транспортной среды с поддержкой CSMA/CA и нагрузки сетевых узлов, т.к. количество конфликтов сильно зависит от загрузки. Кроме того, данная модель является вложенной по отношению к моделям оценки вероятностно-временных характеристик информационных процессов в распределенной вычислительной системе, поэтому расчеты требуют ее многократного использования, что резко увеличивает время, необходимое для исследования.

Поэтому для сетей, реализующих протоколы 802.11, необходима разработка аналитических методов оценки вероятностно-временных характеристик и производительности беспроводных сетей с методом доступа CSMA/CA, позволяющих автоматизировать процессы выбора рациональных режимов работы и снизить влияние коллизий, что имеет актуальную и бесспорную новизну.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Заданы:

1. Передающая среда беспроводной сети – эфир.
2. Доступ к передающей среде – CSMA/CA.
3. Количество узлов беспроводной сети –  $N$ .
4. Размещение узлов. Основная характеристика: расстояние между узлами сети –  $L_{ik}$  ( $i$  и  $k$  – номера узлов), м.
5. Пропускная способность –  $c$ , Мбит/с.
6. Скорость распространения сигнала –  $V_c$ , м/с.
7. Задержка повторной передачи jam-пакетов при обнаружении конфликтов –  $\tau$ , с.
8. Размер jam-пакета –  $L_{jam}$ , бит.
9. Задержка получения подтверждения на переданный jam-пакет –  $\Delta t_{jam}$ , с.
10. Длина информационного пакета –  $L_{пак}$ , бит.
11. Директивное время передачи информационных пакетов –  $T_{дир}^{(1)}$ , с.
12. Потоки пакетов, поступающих в узлы беспроводной сети –  $\lambda_k$ , пак/с ( $k = \overline{1, N}$ ).
13. Межкадровый интервал –  $\Delta t$ , с.

Определяются:

1.  $T_k^{(1)}$  – время доставки информационных пакетов ( $k = \overline{1, N}$ ).
2.  $Q_k$  – вероятность своевременной доставки информационных пакетов ( $k = \overline{1, N}$ ).
3.  $\lambda_{sum}$  – производительность сети.
4. Загрузка узлов и передающей среды беспроводной сети.

Производительность беспроводной сети определяется как суммарная интенсивность своевременно обслуженного потока.

## 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТОДА ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

Задача решается в предположении о пуассоновском характере потоков  $\lambda_k$  ( $k = \overline{1, N}$ ), поступающих на обслуживание в узлы беспроводной сети.

При передаче jam-пакета из  $k$ -го узла конфликт возникает, если в интервале  $(0, T_{ik}]$  узел  $i$  начинает передачу jam-пакета или узел  $i$  начинает передачу jam-пакета в интервале  $[-T_{ik}, 0)$ :

$$\{T_{ik} = L_{ik} / V_c, i = \overline{1, N}, i \neq k\}.$$

Вероятность, что узел  $i$  не начнет передачу в интервале  $2T_{ik}$  при пуассоновском потоке пакетов, поступающих в узлы сети, определяется соотношением  $e^{-\lambda_i 2T_{ik}}$ .

Тогда, вероятность того, что при передаче jam-пакета из  $k$ -го узла не возникнет конфликтов

с jam-пакетами, передаваемыми из других узлов сети, можно оценить с помощью формулы:

$$g_k = \prod_{i=1, i \neq k}^N e^{-\lambda_i 2T_{ik}}, \quad k = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Пусть  $P_k^*(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dP_k(t)$  – преобразование

Лапласа – Стилтеса функции распределения (ФР)  $P_k(t)$  времени передачи пакета из  $k$ -го узла с учетом возникающих конфликтов,  $s$  – комплексный параметр.  $P_k^*(s)$  определяется выражением:

$$P_k^*(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \{P_n(X^*(s))^{n-1} \cdot (V_k^*(s))^{n-1} F^*(s)\}, \quad (2)$$

где  $P_n = (1 - g_k)^{n-1} g_k$  – вероятность того, что пакет будет передан ровно за  $n$  попыток (при передаче jam-пакета конфликты возникнут  $n - 1$  раз);

$F^*(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dF(t)$ ,  $F(t)$  – зависимость времени передачи пакета данных с jam-пакетом без наложения;

$X^*(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dX(t)$ ,  $X(t)$  – ФР случайной задержки повторной передачи jam-пакета при возникновении конфликта (наложении jam-пакетов от разных узлов

сети);  $V_k^*(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dV_k(t)$ ,  $V_k(t)$  – зависимость времени передачи jam-пакета и задержки передачи подтверждения на переданный jam-пакет из  $k$ -го узла при возникновении конфликта.

Тогда

$$P_k^*(s) = \sum_{n=1}^{\infty} (1 - g_k)^{n-1} g_k (X^*(s))^{n-1} \times \times (V_k^*(s))^{n-1} F^*(s) = g_k F^*(s) \frac{1}{1 - (1 - g_k) X^*(s) V_k^*(s)}. \quad (3)$$

Учитывая свойства преобразования Лапласа – Стилтеса [16], легко получить выражения для моментов  $P_k^{(1)}$  и  $P_k^{(2)}$  ФР  $P_k(t)$ , продифференцировав по  $s$  выражение (3).

Методики расчета моментов ФР  $V_k(t)$  и  $X(t)$  и необходимые расчетные формулы для оценки загрузки передающей среды и узлов сети представлены в работе [16].

Моменты ФР  $G_k(t)$  времени обслуживания пакета, поступившего в  $k$ -й узел сети, определяются следующей очевидной формулой:

$$G_k^{(1)} = P_k^{(1)} + W_k^{(1)}, \quad G_k^{(2)} = P_k^{(2)} + 2P_k^{(1)}W_k^{(1)} + W_k^{(2)}, \quad (4)$$

где  $W_k^{(1)}$  и  $W_k^{(2)}$  – моменты ФР  $W_k(t)$  времени ожидания начала передачи пакета при его поступлении в свободный  $k$ -й узел беспроводной сети [16].

Учитывая, что потоки пакетов, поступающие в узлы сети, являются пуассоновскими, среднее время ожидания пакетов в очереди на обслуживание в  $k$ -м узле  $W_{ожk}^{(1)}$  определяется формулой Поллачека – Хинчина [10]:

$$W_{ожk}^{(1)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_k G_k^{(2)}}{1 - \lambda_k G_k^{(1)}}. \quad (5)$$

Среднее время обслуживания пакетов  $T_k^{(1)}$  с учетом времени ожидания начала передачи в узлах сети определяется выражением:

$$T_k^{(1)} = W_{ожk}^{(1)} + G_k^{(1)}. \quad (6)$$

Также как и в работе [16], вероятности своевременной доставки пакетов  $Q_k$ , поступающих в  $k$ -й узел беспроводной сети, задаются соотношениями:

$$Q_k = \frac{h(1 - \lambda_k G_k^{(1)})}{h - \lambda_k + \lambda_k G_k^*(h)} G_k^*(h), \quad k = \overline{1, N}, \quad (7)$$

где  $h = 1 / T_{дир}^{(1)}$ ,  $T_{дир}(t) = 1 - e^{-ht}$ ,  $T_{дир}^{(1)}$  – директивное время передачи пакетов в сети.

$$G_k^*(h) = \frac{1}{\left(\frac{h}{y_k} + 1\right)^{x_k}}, \quad x_k = \frac{(G_k^{(1)})^2}{G_k^{(2)} - (G_k^{(1)})^2}, \quad (8)$$

$$y_k = \frac{G_k^{(1)}}{G_k^{(2)} - (G_k^{(1)})^2}.$$

Соотношения (8) можно легко получить, аппроксимируя ФР  $G_k(t)$  по двум моментам  $G_k^{(1)}$  и  $G_k^{(2)}$  гамма-распределением и учитывая предположение, что ограничение на директивное время обслуживания пакетов в сети  $T_{дир}(t)$  является случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону. Соответствующие преобразования представлены в работе [16].

Суммарная интенсивность своевременно обслуженного потока (производительность сети) рассчитывается по формуле

$$\lambda_{sum} = \sum_{k=1}^N \lambda_k Q_k, \quad (9)$$

где  $Q_k$  определяется соотношением (7).

Разработанный метод оценки эффективности беспроводных сетей с методом доступа CSMA/CA является основой для реализации систем автоматизированного проектирования беспроводных сетей различного назначения, включая Wi-Fi и беспроводные сети большой протяженности, использующие для связи узконаправленные антенны и метод доступа CSMA/CA.

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

Для практического использования рассмотренной аналитической модели оценки эффективности сетей с методом доступа CSMA/CA на языке C++ в среде объектно-ориентированного программирования *Boland C++ Builder* разработан комплекс программ «Система аналитического моделирования процессов передачи информации в сетях».

Исходные данные вводятся с экрана дисплея в режиме диалога в соответствии с заданными формами. Оператор, не выходя из системы моделирования, имеет возможность осуществить корректировку исходных данных, сохранить соответствующие им результаты расчетов в текстовых и графических файлах.

На рис. 1 представлена экранная форма ввода исходных данных и вывода результатов моделирования.

Комплекс программ позволяет проводить расчеты при любых заданных размерах беспроводной сети CSMA/CA, ее пропускной способности и различном размещении узлов сети. Тип размещения узлов может быть случайным или детерминированным. При детерминированном размещении узлы могут находиться на одинаковом расстоянии от соседних узлов (эквидистантное размещение) или на разных расстояниях (неэквидистантное размещение). Отметим, что ограничение на время передачи пакетов задается при вводе исходных данных. Вероятность доставки пакетов за время, не превышающее директивное, существенно зависит от заданного ограничения на время доставки пакетов. Производительность, определенная нами как суммарный своевременно переданный в беспроводной сети поток пакетов, также существенным образом зависит от заданных ограничений на время доставки пакетов. Такие характеристики как загрузка узлов и передающей среды, а также вероятностно-временные характеристики (время ожидания в очередях, время передачи пакетов) не зависят от введенных ограничений на время передачи, но, естественно, существенным образом зависят от пропускной способности передающей среды, количества узлов, их размещения, размеров сети,

интенсивности потоков пакетов, поступающих на обслуживание в узлы беспроводной сети, длины информационных пакетов и от временных задержек, возникающих при наложениях jam-пакетов. При моделировании скорость распространения сигналов в передающей среде принималась равной скорости света.

Для демонстрации проведения расчетов вероятностно-временных характеристик процессов доставки пакетов и производительности беспроводных сетей с помощью разработанного аналитического метода проведем моделирование передачи пакетов в беспроводной сети CSMA/CA. Для моделирования выбраны следующие исходные данные:

- размер беспроводной сети CSMA/CA – 500 м;
- тип распределения узлов в сети – случайный;
- количество узлов в сети  $N = 100$ ;
- пропускная способность – 100 Мбит/с;
- скорость распространения сигнала –  $3 \cdot 10^8$  м/с;
- максимальная задержка повторной передачи пакета – 10 мкс;
- длина jam-пакета – 32 бит;
- директивное время – 0.005 с;
- длина информационного пакета – 1 кбит;
- интенсивность поступления пакетов во все узлы одинакова.

Отметим, что разработанный комплекс программ позволяет проводить моделирование и при разной интенсивности пакетов, поступающих на обслуживание в узлы сети.

Результаты расчетов вероятностно-временных характеристик, производительности, загрузки узлов и передающей среды с заданными исходными данными при изменении нагрузки (изменении интенсивности потоков пакетов, поступающих на обслуживание в узлы сети) представлены на рис. 2–6.

Время доставки пакетов в беспроводной сети зависит от времени ожидания передачи в очереди на узлах сети и времени передачи пакета с учетом возникающих конфликтов. Поэтому параметры обработки информации в беспроводной сети должны выбираться таким образом, чтобы во всем диапазоне изменения интенсивности потоков обрабатываемых пакетов в системе не возникало узких мест, т.е. перегрузок отдельных узлов и передающей среды. В сбалансированной системе загрузка передающей среды и загрузка узлов при увеличении нагрузки должны быть близки друг другу. С уменьшением длины сети и уменьшением количества узлов при заданной пропускной способности передающей среды длина передаваемых пакетов должна увеличиваться таким образом, чтобы сеть была сбалансированной при увеличении нагрузки.

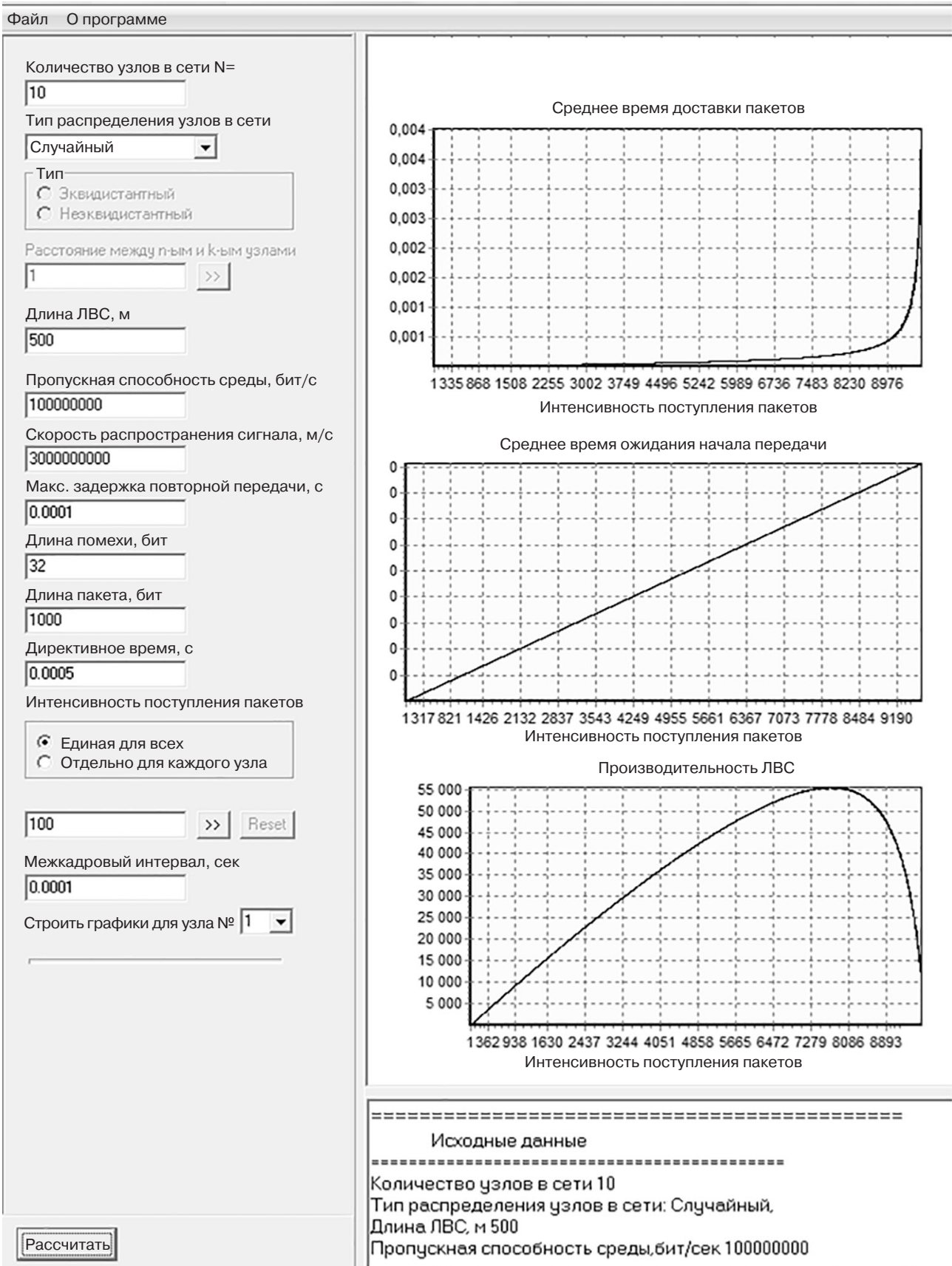


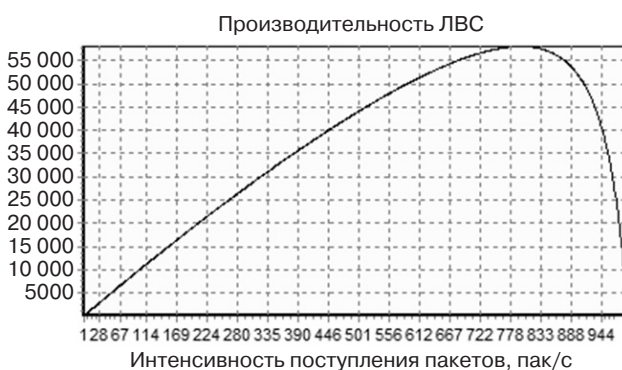
Рис. 1. Экранная форма ввода-вывода результатов моделирования.  
ЛВС – локальная вычислительная сеть



**Рис. 2.** Зависимость среднего времени ожидания передачи пакетов в узлах от интенсивности поступления пакетов в узлы беспроводной сети и одинаковой интенсивности поступления пакетов в узлы сети



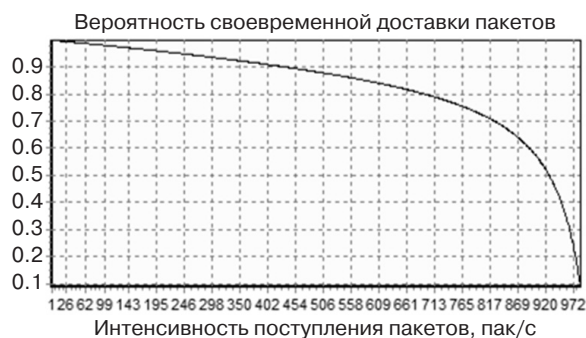
**Рис. 5.** Зависимость загрузки передающей среды при поступлении пакета в узел от интенсивности поступления пакетов в узлы беспроводной сети при случайном размещении узлов ( $N = 100$ ), одинаковой интенсивности поступления пакетов в узлы сети



**Рис. 3.** Зависимость производительности сети от интенсивности поступления пакетов в узлы беспроводной сети при случайном размещении узлов ( $N = 100$ ), одинаковой интенсивности поступления пакетов в узлы сети и ограничении на время доставки пакетов



**Рис. 6.** Зависимость загрузки узлов сети от интенсивности поступления пакетов в узлы беспроводной сети при случайном размещении узлов ( $N = 100$ ) и одинаковой интенсивности поступления пакетов в узлы сети



**Рис. 4.** Зависимость вероятности своевременной доставки пакетов от интенсивности поступления пакетов в узлы беспроводной сети при случайном размещении узлов ( $N = 100$ ), одинаковой интенсивности поступления пакетов в узлы сети и ограничении на время доставки пакетов

Отметим, что с увеличением размеров сети и увеличением количества узлов при заданной пропускной способности сети для сбалансированности сети во всем диапазоне изменения нагрузки для

получения оптимальной производительности при ограничениях на время передачи необходимо уменьшать длину передаваемых информационных пакетов, т.к. при этом будет уменьшаться вероятность возникновения конфликтов.

Конкретные рекомендации по выбору параметров и режимов функционирования беспроводной сети можно получить, проводя многовариантные аналитические расчеты с помощью комплекса программ, реализующего разработанный аналитический метод исследования беспроводных сетей с множественным доступом CSMA/CA к передающей среде.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие основные результаты.

Проведена классификация моделей анализа вероятностно-временных характеристик обработки информации в распределенных информационно-вычислительных системах.

Показана необходимость первоочередной разработки вложенных аналитических моделей,

описывающих процессы передачи пакетов при ограничениях на время передачи информации в сетях на канальном уровне.

Получены аналитические формулы для оценки временных характеристик передачи пакетов, загрузки узлов, загрузки передающей среды и производительности беспроводных сетей с методом доступа CSMA/CA, работа которых описывается стандартом связи IEEE 802.11.

На базе разработанного аналитического метода реализован комплекс программ. Применение программных средств позволяет оценить производительность беспроводной сети и вероятностно-временные характеристики передачи пакетов при различных пропускных способностях передающей среды и размерах сети, а также дает возможность осуществить многовариантный анализ различных

режимов функционирования беспроводных сетей с методом доступа CSMA/CA.

Изложение теоретических положений предложенного аналитического метода по оценке вероятностно-временных характеристик и производительности при ограничении на время передачи информации в беспроводных сетях CSMA/CA является достаточно универсальным и используется при формировании практических работ по дисциплинам «Архитектура вычислительных систем» и «Методы и средства защиты компьютерной информации» РТУ МИРЭА.

**Вклад авторов.** Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

**Authors' contribution.** All authors equally contributed to the research work.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таненбаум Э.С., Уэзеролл Д. *Компьютерные сети*: пер. с англ. СПб.: Питер; 2018. 960 с.
2. Кузьменко Н.Г. *Компьютерные сети и сетевые технологии*. М.: Наука и техника; 2015. 368 с.
3. Епанишников А.М. *Локальные вычислительные сети*. М.: Диалог-МИФИ; 2014. 224 с.
4. Смирнова Е.В. *Технологии современных сетей Ethernet. Методы коммутации и управления потоками данных*. М.: БХВ-Петербург; 2012. 272 с.
5. Акимова Г.П., Соловьев А.В., Тарханов И.А. Моделирование надежности распределенных вычислительных систем. *Информационные технологии и вычислительные системы (ИТuBC)*. 2019;3:79–86. <https://doi.org/10.14357/20718632190307>
6. Павский В.А., Павский К.В. Математическая модель для расчета показателей надежности масштабируемых вычислительных систем с учетом времени переключения. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2020;2(212):134–145. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-2-134-145>
7. Леонтьев А.С. Многоуровневые аналитические и аналитико-имитационные модели оценки вероятностно-временных характеристик многомашинных вычислительных комплексов с учетом надежности. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2023;5(131). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.131.8>
8. Леонтьев А.С., Тимошкин М.С. Исследование погрешности многоуровневых аналитических и аналитико-имитационных моделей оценки вероятностно-временных характеристик многомашинных вычислительных комплексов с учетом надежности. *Научный журнал «Наукофера»*. 2023;3(1):143–156. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7736570>
9. Альшаев И.А., Лаврухин В.А. О проектировании и оптимизации сетей Wi-Fi. *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2016;4(1):87–95.
10. Денисенко В. Беспроводные локальные сети. Часть 2. *Современные технологии автоматизации (СТА)*. 2009;2:96–101.
11. Хелд Г. *Технологии передачи данных*: пер. с англ. СПб.: Питер, ВHV; 2003. 720 с.
12. Шарафуллина А.Ю., Галямов Р.Р., Зарипова Р.С. Технические принципы создания беспроводной локальной сети Wi-Fi. *T-Comm: Телекоммуникация и транспорт*. 2021;15(7):28–33.
13. Звонарева Г.А., Бузунов Д.С. Использование имитационного моделирования для оценки временных характеристик распределенной вычислительной системы. *Открытое образование*. 2022;26(5):32–39. <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2022-5-32-39>
14. Бродский Ю.И. *Распределенное имитационное моделирование сложных систем*. М.: Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН; 2010. 156 с.
15. Zhmatov D.V. Impulse Disturbance Filtration at Digital Substations. In: *Proceedings of 14th International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/MLSD52249.2021.9600257>
16. Леонтьев А.С. Разработка аналитических методов, моделей и методик анализа локальных вычислительных сетей. *Теоретические вопросы программного обеспечения: Межвузовский сборник научных трудов*. М.: МИРЭА; 2001. С. 70–94.

## REFERENCES

1. Tanenbaum E.S., Wetherall D. *Computer Networks*: transl. from Engl. St. Petersburg: Piter; 2018. 960 p. (in Russ.). [Tanenbaum E.S., Wetherall D. *Computer Networks*. Prentice Hall; 2011. 962 p.]
2. Kuzmenko N.G. *Komp'yuternye seti i setevye tekhnologii (Computer Networks and Networking Technologies)*. Moscow: Nauka i Tekhnika; 2015. 368 p. (in Russ.).
3. Epanishnikov A.M. *Lokal'nye vychislitel'nye seti (Local Area Networks)*. Moscow: Dialog-MIFI; 2014. 224 p. (in Russ.).
4. Smirnova E.V. *Tekhnologii sovremennykh setei Ethernet. Metody kommutatsii i upravleniya potokami dannykh (Modern Ethernet Network Technologies. Methods of Data Switching and Flow Control)*. Moscow: BKhV-Peterburg; 2012. 272 p. (in Russ.).
5. Akimova G.P., Solovyev A.V., Tarkhanov I.A. Modelling the Reliability of Distributed Information Systems. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy (ITiVS) = J. Inform. Technol. & Computing Syst.* 2019;3:79–86 (in Russ.). <https://doi.org/10.14357/20718632190307>
6. Pavsky V.A., Pavsky K.V. Mathematical Model for Calculating Reliability Indicators of Scalable Computer Systems Considering Switching Time. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences.* 2020;2(212): 134–145 (in Russ.). <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-2-134-145>
7. Leontyev A.S. Multilevel Analytical and Analytical-Simulation Models for Evaluating the Probabilistic and Temporal Characteristics of Multimachine Computing Complexes with Regard to Reliability. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal.* 2023;5(131) (in Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.131.8>
8. Leontyev A.S., Timoshkin M.S. Research of the error of multilevel analytical and analytic-simulation models for evaluation of the probabilistic-time characteristics of multi-machine computing complexes with reliability included. *Naukosfera.* 2023;3(1):143–156 (in Russ.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7736570>
9. Alshaev I.A., Lavrukhin V.A. Wi-Fi Networks Design and Optimization. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii = Information Technologies and Telecommunications.* 2016;4(1):87–95 (in Russ.).
10. Denisenko V. Wireless Local Area Networks. Part 2. *Sovremennye Tekhnologii Avtomatizatsii = STA.* 2009;2:96–101 (in Russ.).
11. Held G. *Tekhnologii peredachi dannykh (Data Transmission Technologies)*: transl. from Engl. St. Petersburg: Piter, BHV; 2003. 720 p. (in Russ.). [Held G. *Understanding Data Communications*. Boston: Addison-Wesley; 2002. 788 p.]
12. Sharafullina A.Yu., Galyamov R.R., Zaripova R.S. Technical Principles of Creating a Wireless Local Network Wi-Fi. *T-Comm: Telekommunikatsiya i transport = T-Comm.* 2021;15(7):28–33 (in Russ.).
13. Zvonareva G.A., Buzunov D.S. Using Simulation Modeling to Estimate Time Characteristics of a Distributed Computing System. *Otkrytoe obrazovanie = Open Education.* 2022;26(5):32–39 (in Russ.). <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2022-5-32-39>
14. Brodskii Yu.I. *Raspredelelnoe imitatsionnoe modelirovanie slozhnykh sistem (Distributed Simulation Modeling of Complex Systems)*. Moscow: Vychislitel'nyi tsentr im. A.A. Dorodnitsyna RAN; 2010. 156 p. (in Russ.).
15. Zhmatov D.V. Impulse Disturbance Filtration at Digital Substations. In: *Proceedings of 14th International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/MLSD52249.2021.9600257>
16. Leontyev A.S. Development of Analytical Methods, Models, and Techniques for Local Area Networks Analysis. In: *Theoretical Issues of Software Engineering: Interuniversity Collection of Scientific Papers*. Moscow: MIREA; 2001. P. 70–94 (in Russ.).

### Об авторах

**Леонтьев Александр Савельевич**, к.т.н., старший научный сотрудник, доцент кафедры математического обеспечения и стандартизации информационных технологий, Институт информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: leontev@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 5798-9721, <https://orcid.org/0000-0003-3673-2468>

**Жматов Дмитрий Владимирович**, к.т.н., доцент, доцент кафедры математического обеспечения и стандартизации информационных технологий, Институт информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: zhmatov@mirea.ru. Scopus Author ID 56825948100, SPIN-код РИНЦ 2641-6783, <https://orcid.org/0000-0002-7192-2446>

### About the authors

**Alexander S. Leontyev**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Associate Professor, Department of Mathematical Support and Standardization, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: leontev@mirea.ru. RSCI SPIN-code 5798-9721, <https://orcid.org/0000-0003-3673-2468>

**Dmitry V. Zhmatov**, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Associate Professor, Department of Mathematical Support and Standardization, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: zhmatov@mirea.ru. Scopus Author ID 56825948100, RSCI SPIN-code 2641-6783, <https://orcid.org/0000-0002-7192-2446>