

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 519.95:621.3
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-124-133>
EDN DPUAHF



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ производительности и временных характеристик промышленных сетей со случайным и детерминированным эквидистантным распределением узлов

А.С. Леонтьев, Д.В. Жматов [®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: zhmatov@mirea.ru

• Поступила: 21.10.2025 • Доработана: 20.11.2025 • Принята к опубликованию: 05.02.2026

Резюме

Цели. Цель работы – разработка математического аппарата для оценки производительности и вероятностно-временных характеристик процессов передачи пакетов в промышленных сетях, использующих метод случайного множественного доступа. Особенностью исследования является учет строгих ограничений на время доставки пакетов и влияние коллизий.

Методы. В основе исследования лежат методы теории случайных процессов. Для аналитического вывода ключевых соотношений и доказательства основной теоремы применяется аппарат преобразования Лапласа – Стильтеса.

Результаты. Сформулирована и доказана теорема, определяющая форму преобразования Лапласа – Стильтеса для функции распределения времени передачи пакета. Этот результат учитывает повторные передачи пакетов, вызванные конфликтами в среде с множественным доступом. Проведен анализ процессов передачи информации в промышленных сетях со случайным множественным доступом, включая изменение количества рабочих станций и интенсивности потоков пакетов. Анализировались пакеты, поступающие в узлы сети, оценивались производительность системы, степень загрузки узлов и канала передачи, а также время доставки пакетов с учетом возникающих конфликтов. Выявлено значительное различие во временных характеристиках передачи между центральными и периферийными узлами сети. Для автоматизации исследований и оценки различных режимов работы сети при ее масштабировании и увеличении нагрузки на узлы разработан и реализован программный комплекс.

Выводы. При проведении исследования промышленных сетей со случайным множественным доступом выявлено, что при масштабировании сети с увеличением количества узлов возрастает производительность сети, однако при значительном увеличении загрузки узлов и передающей среды производительность падает. Загрузка крайних узлов и время передачи пакетов из-за повышенного возрастания конфликтов возрастают значительно быстрее по сравнению с центральными узлами. Производительность и временные характеристики при увеличении количества узлов несущественно зависят от типа распределения узлов – случайного или детерминированного эквидистантного. Для обеспечения сбалансированности режимов работы промышленной сети со случайным множественным доступом предлагается на 10–15% уменьшить нагрузку на крайние узлы. При этом можно обеспечить примерно одинаковую загрузку передающей среды и узлов при увеличении их количества.

Ключевые слова: промышленная сеть, производительность, временные характеристики, преобразование Лапласа – Стилтеса, множественный доступ, масштабирование

Для цитирования: Леонтьев А.С., Жматов Д.В. Анализ производительности и временных характеристик промышленных сетей со случайным и детерминированным эквидистантным распределением узлов. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):124–133. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-124-133>, <https://www.elibrary.ru/DPUAHF>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Performance analysis and timing characteristics in industrial networks with random and deterministic node distributions

Alexander S. Leontyev, Dmitry V. Zhmatov [®]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: zhmatov@mirea.ru

• Submitted: 21.10.2025 • Revised: 20.11.2025 • Accepted: 05.02.2026

Abstract

Objectives. The aim of the study was to develop mathematical tools to assess the performance and probabilistic-temporal characteristics of packet transmission processes in industrial networks employing random multiple access. Our study specifically examined strict packet delivery time constraints and the impact of collisions.

Methods. The research applies methods from the theory of random processes. We used the Laplace–Stieltjes transform to derive key relationships analytically and prove the main theorem.

Results. We formulated and proved a theorem which defines the Laplace–Stieltjes transform for the packet transmission time distribution function. The result incorporates packet retransmissions caused by conflicts in the multiple access environment. We analyzed information transmission processes in industrial networks with random multiple access, considering variations in the number of workstations and packet flow intensities at network nodes. Our evaluation included throughput, node and transmission medium utilization, and packet transmission times under collision conditions. The results reveal significant differences in the temporal characteristics of packet transmission between central and edge nodes. We developed and implemented a software package, in order to automate the study and evaluate various network operating modes during scaling and under increased nodal load.

Conclusions. The study of industrial networks with random multiple access established that while network throughput increases with the number of nodes during scaling, it degrades under significantly high node and transmission medium utilization. The utilization of edge nodes and their packet delivery times increase markedly faster than those of central nodes. This is due to a higher collision rate. As the network size increases, the performance and temporal characteristics exhibit only marginal dependence on the node distribution type: random or deterministic equidistant. In order to ensure balanced operation in an industrial network with random multiple access, we propose reducing the load on edge nodes by 10–15%. This strategy can maintain approximately uniform utilization of both the transmission medium and the nodes as their number increases.

Keywords: industrial network, performance, temporal characteristics, Laplace–Stieltjes transform, multiple access, scalability

For citation: Leontyev A.S., Zhmatov D.V. Performance analysis and timing characteristics in industrial networks with random and deterministic node distributions. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):124–133. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-124-133>, <https://www.elibrary.ru/DPUAHF>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

При анализе эффективности функционирования промышленных сетей связи необходимо учитывать особенности процессов передачи данных, происходящих на первых трех уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем (open systems interconnection, OSI). Именно эти уровни определяют корректность формирования кадров, адресацию, контроль ошибок и обеспечение физического канала передачи информации.

Одним из ключевых требований, предъявляемых к промышленным сетям, интегрированным в состав автоматизированных систем управления различного назначения, является ограничение по времени доставки данных. Соблюдение этого параметра имеет решающее значение для поддержания требуемых временных показателей технологических процессов и обеспечения стабильного функционирования распределенных систем управления.

Для оценки производительности и вероятностно-временных характеристик процессов передачи данных была исследована промышленная сеть, в которой реализован метод множественного доступа с прослушиванием несущей и обнаружением коллизий (carrier sense multiple access with collision detection, CSMA/CD). Данный метод обеспечивает организацию совместного доступа нескольких узлов к общей передающей среде за счет предварительного контроля состояния канала и прекращения передачи при обнаружении конфликта сигналов. Пропускная способность канала передачи данных в рамках моделирования принималась равной $C = 1$ Гбит/с, что соответствует характеристикам типовых проводных промышленных сетей стандарта Ethernet.

В ходе анализа изучались зависимости исследуемых параметров от количества узлов сети как для периферийных, так и для центральных элементов. Дополнительно рассматривались различия между вариантами случайного распределения узлов вдоль линии связи и их равномерного (эквидистантного) размещения.

1. ТЕОРЕМА О ПРЕОБРАЗОВАНИИ ЛАПЛАСА – СТИЛТЬЕСА ДЛЯ ВРЕМЕНИ ПЕРЕДАЧИ ПАКЕТА

В качестве интегрального показателя эффективности промышленной сети, аналогично подходу, предложенному в работе [1], использовалась суммарная интенсивность потока данных, своевременно обработанного всеми узлами системы:

$$\lambda_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^N \lambda_i Q_i, \quad (1)$$

где Q_i – вероятность своевременной доставки пакетов, поступающих из i -го узла; λ_i – интенсивность пакетов, поступающих в i -й узел.

Как показано в работе [1], вероятность того, что при обслуживании пакета, поступившего в k -й узел, не возникнет конфликтов, оценивается с помощью формулы:

$$q_k = \prod_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N e^{-\lambda_n} 2^{\frac{L_{nk}}{V_c}}, \quad k = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где N – количество узлов в сети, L_{nk} – расстояние между k -м и n -м узлами сети, V_c – скорость распространения сигнала в передающей среде.

Вероятность P_n того, что пакет, поступивший в k -й узел, будет передан ровно за n попыток (т.е. при передаче возникнет $(n - 1)$ конфликт), равна:

$$P_n = (1 - q_k)^{n-1} q_k. \quad (3)$$

На основании полученных ранее А.С. Леонтьевым и опубликованных впервые в 2001 г. оригинальных результатов по разработке математических методов исследования локальных сетей [1], можно сформулировать следующую теорему:

Теорема. Преобразование Лапласа – Стилтеса $Z_k^*(s)$ функции распределения времени передачи пакета из k -го узла с учетом возникающих конфликтов определяется выражением:

$$Z_k^*(s) = q_k T^*(s) \frac{1}{1 - (1 - q_k) X^*(s) V_k^*(s)}, \quad (4)$$

где $V_k^*(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dV_k(t)$ – функция распределения времени разрешения конфликта пакета, идущего из k -го узла; $X^*(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dX(t)$; $X(t)$ – функция распределения времени задержки перед повторной передачей пакета при возникновении конфликта; $T^*(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dT(t)$; $T(t)$ – функция распределения времени передачи пакета без конфликта.

Доказательство. Вывод формулы преобразования Лапласа – Стильтеса для функции распределения времени передачи пакета с учетом возможных конфликтов.

Преобразование Лапласа – Стильтеса для функции $F(t)$, у которой производная равна $F'(t) = f(t)$, определяется следующим образом:

$$F^*(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt.$$

Преобразование Лапласа – Стильтеса характеризуется свойством мультипликативности [2–6]: если случайные величины $\xi_{\Sigma} = \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_N$ независимы и имеют функции распределения $F_i(t)$, то преобразование Лапласа – Стильтеса для суммарной функции распределения определяется как произведение преобразований отдельных функций:

$$F_{\Sigma}^*(s) = F_1^*(s) \cdot F_2^*(s) \cdot \dots \cdot F_N^*(s).$$

Применим эти данные для вывода функциональных соотношений времени передачи пакетов в промышленных сетях. Обозначим через P_n вероятность того, что пакет будет успешно передан именно с n -й попытки. В этом случае время передачи пакета при n попытках можно выразить следующим образом:

$$\xi_{\text{пер}(n)} = \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_{n-1} + \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_{n-1} + T_{\text{пер}} = \sum_{i=1}^{n-1} \xi_i + \sum_{i=1}^{n-1} \eta_i + T_{\text{пер}},$$

где ξ_i – время разрешения i -го конфликта; $\sum_{i=1}^{n-1} \xi_i$ – общее время разрешения $(n-1)$ конфликтов; η_i – время задержки перед повторной передачей пакета при возникновении i -го конфликта; $\sum_{i=1}^{n-1} \eta_i$ – общее время задержки при возникновении $(n-1)$ конфликтов; $T_{\text{пер}}$ – время передачи пакета (n -я попытка).

Если все ξ имеют одну и ту же функцию распределения $V(t)$, а все η – одну и ту же функцию распределения $X(t)$, то преобразование Лапласа – Стильтеса функции распределения времени передачи пакета ровно за n попыток примет вид:

$$B_n^*(s) = (V_k^*(s))^{n-1} (X^*(s))^{n-1} T^*(s).$$

Преобразование Лапласа – Стильтеса функции распределения времени передачи пакета из k -го узла с учетом возникающих конфликтов будет определяться выражением:

$$Z_k^*(s) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n B_n^*(s) = \sum_{n=1}^{\infty} [P_n (X^*(s))^{n-1} (V_k^*(s))^{n-1} T^*(s)], \quad (5)$$

$$Z_k^*(s) = \sum_{n=1}^{\infty} (1 - q_k)^{n-1} q_k (X^*(s))^{n-1} (V_k^*(s))^{n-1} T^*(s) = (6) = q_k T^*(s) \frac{1}{1 - (1 - q_k) X^*(s) V_k^*(s)},$$

где $q_k T^*(s)$ – первый член, а $(1 - q_k) X^*(s) V_k^*(s)$ – знаменатель бесконечно убывающей геометрической прогрессии. Выражение (6) совпадает с формулой (4), что и доказывает теорему.

Продифференцировав полученное выражение по s , получим выражения для моментов $Z_k^{(1)}$ и $Z_k^{(2)}$ функции распределения, $Z_k(t)$, $B_k^{(1)}$, $B_k^{(2)}$, с помощью которых можно вывести функциональные соотношения времени передачи пакетов в сетях [1, 2, 7].

При моделировании длина сети принималась равной 500 и 1000 м соответственно. Распределение узлов в сети может быть детерминированным с равными интервалами или случайным. В случае случайного распределения позиции узлов задавались произвольно [8–16].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ПРОМЫШЛЕННОЙ СЕТИ

В процессе моделирования принята пропускная способность канала связи $C = 1$ Гбит/с, а скорость распространения электромагнитного сигнала по линии составила $V_c = 2.9 \cdot 10^8$ м/с. При этом максимальная задержка повторной передачи при обнаружении коллизий (наложения пакетов, передаваемых одновременно) составила $\tau = 0.0005$ с. Для имитации помехового воздействия использовался пакет длиной $L_{\text{пом}} = 36$ бит, директивное время передачи одного пакета принималось

равным $T_{дир}^{(1)} = 0.001$ с, а длина передаваемого пакета $L_{пак} = 4096$ бит, Интенсивность поступления данных в узлы моделируемой сети (λ_n) изменялась от 1200 до 1800 пак/с при межкадровом интервале $\Delta t = 0.0005$ с.

Полученные результаты численного эксперимента отражены на рис. 1–7. Из анализа зависимостей (рис. 1) следует, что при увеличении количества сетевых узлов и их случайном размещении по длине линии связи $L_{сети} = 500$ м, а также при интенсивности потока $\lambda_n = 1800$ пак/с, $N = 1,110$, достигается равномерная загрузка ρ центральных участков сети и передающего канала. В то же время пограничные узлы демонстрируют более высокий уровень загрузки, превышающий среднее значение примерно на 10–15%. Это связано с увеличением вероятности конфликтов пакетов на границах сети, где чаще фиксируются взаимные интерференции. Полученные результаты подтверждают влияние геометрического расположения узлов и топологических особенностей сети на эффективность функционирования канала передачи данных. Это приводит к существенному увеличению времени передачи пакетов из крайних узлов при масштабировании сети из-за большой загрузки крайних узлов. Отметим, что загрузка остается практически такой же и при детерминированном эквидистантном распределении узлов по длине сети.

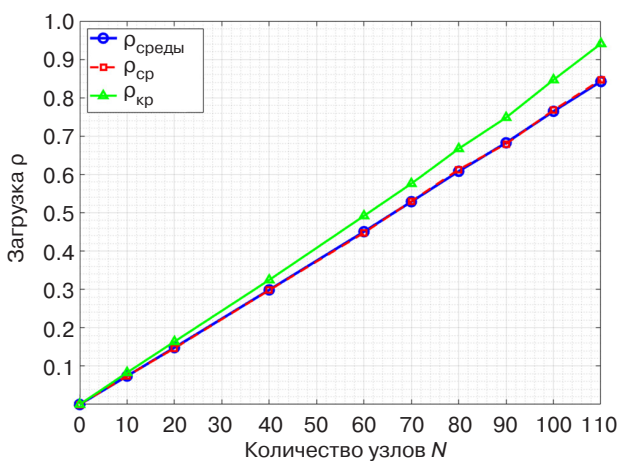


Рис. 1. Загрузки передающей среды ($\rho_{среды}$), крайнего ($\rho_{кр}$) и среднего ($\rho_{ср}$) узлов при случайном распределении узлов в сети

На рис. 2 представлена зависимость времени передачи пакетов от числа узлов сети N при интенсивности поступления пакетов $\lambda_n = 1800$ пак/с, где сравнивается время доставки из среднего и крайнего узлов для двух схем распределения узлов – случайной и детерминированной эквидистантной – и показано влияние топологии сети и расположения узлов на характеристики доставки.

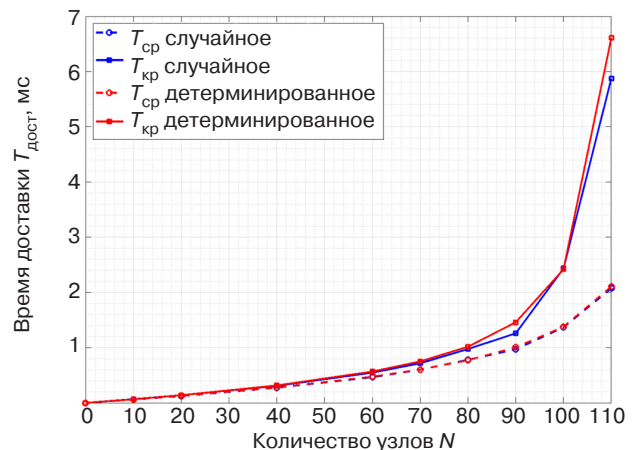


Рис. 2. Время доставки пакетов, поступающих из среднего ($T_{ср}$) и крайнего ($T_{кр}$) узлов при случайном и детерминированном эквидистантном распределении

Среднее время доставки пакетов, поступающих из крайних узлов, при большом количестве узлов (соответственно и при их высокой загрузке) может в несколько раз превышать среднее время доставки пакетов, поступающих из средних узлов, как при случайном, так и при детерминированном эквидистантном распределении узлов. Отметим, что временные характеристики передачи пакетов при их случайном и детерминированном эквидистантном размещении отличаются при масштабировании сети несущественным образом.

На рис. 3 показано, как вероятность своевременной доставки пакетов Q зависит от общего количества узлов N в сети. Анализ проведен отдельно для пакетов, поступающих от средних и крайних узлов, при интенсивности генерации трафика $\lambda_n = 1800$ пак/с на каждом узле. График позволяет сравнить, как различные схемы распределения узлов – случайная и детерминированная эквидистантная – влияют на гарантии своевременной доставки для разных категорий узлов при масштабировании сети. При масштабировании сети (увеличении количества узлов) вероятность своевременной доставки пакетов резко падает. Это падение более выражено для крайних узлов сети. Характер распределения узлов сети (случайный или детерминированный эквидистантный) в меньшей степени влияет на вероятность своевременной доставки пакетов.

На рис. 4 представлена зависимость производительности сети λ_{tot} от общего количества узлов N . Исследование проводилось для постоянной интенсивности генерации пакетов каждым узлом, составляющей $\lambda_n = 1800$ пак/с, $N = 1,110$. График позволяет сравнить влияние топологии сети (случайное и детерминированное эквидистантное распределение узлов) на пропускную способность. Анализ кривых показывает, как масштабирование сети сказывается

на ее общей производительности при разных принципах организации.

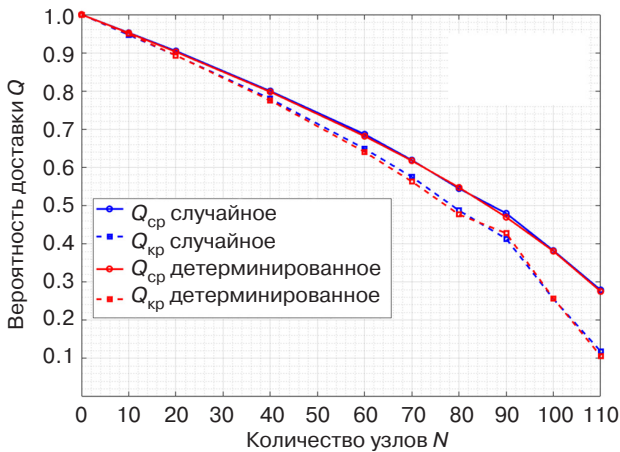


Рис. 3. Вероятность своевременной доставки пакетов, поступающих из среднего ($Q_{ср}$) и крайнего ($Q_{кр}$) узлов при случайном и детерминированном эквидистантном распределении узлов

Как видно из рис. 4, тип распределения узлов (случайный или детерминированный) несущественно влияет на производительность. При масштабировании сети с увеличением количества узлов производительность сначала возрастает, потом достигает максимума и резко падает. Это связано с тем, что с увеличением количества узлов возрастают загрузки узлов и передающей среды, резко возрастает время передачи пакетов и соответственно снижается вероятность обработки пакетов за время, не превышающее директивное. Это приводит к снижению производительности.

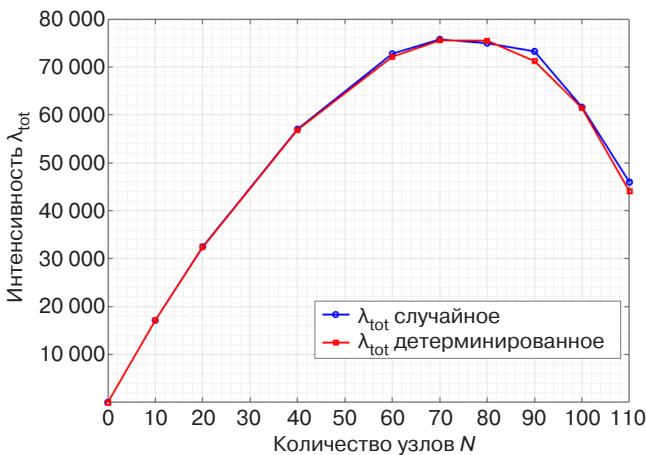


Рис. 4. Производительность сети при случайном и детерминированном эквидистантном распределении узлов сети

Рис. 5–7 демонстрируют, как изменяются основные характеристики промышленной сети со случайным множественным доступом при масштабировании в том случае, когда уменьшается интенсивность

пакетов, поступающих в узлы сети, до $\lambda_n = 1200$ пак/с, $N = 1,110$.

На рис. 5 показано, как количество узлов N в сети влияет на загрузку ее ключевых элементов: передающей среды, а также крайних и средних узлов. Данные получены для двух сценариев топологии – с детерминированным и случайным расположением узлов, при интенсивности входящего трафика $\lambda_n = 1200$ пак/с на каждом узле. Графики показывают, что загрузка узлов и передающей среды несущественно зависит от типа распределения узлов, но существенно зависят от длины сети. Как видно из графиков, загрузка передающей среды возрастает значительно быстрее, чем загрузка узлов. В то же время при сниженной интенсивности входящего потока пакетов рост загрузки как узлов, так и передающей среды происходит значительно медленнее по мере увеличения масштабов сети. Это указывает на более устойчивое функционирование системы при умеренных нагрузках. Максимальные значения загрузки каналов передачи и сетевых узлов, учитывающие влияние возникающих коллизий, достигаются лишь при большем общем количестве активных элементов сети, что подтверждает зависимость эффективности работы системы от плотности ее топологической структуры и интенсивности трафика. В частности, в данном случае критическое количество узлов N равно 190, в то время как при $\lambda_n = 1800$ пак/с критическое значение $N = 110$ (рис. 1).

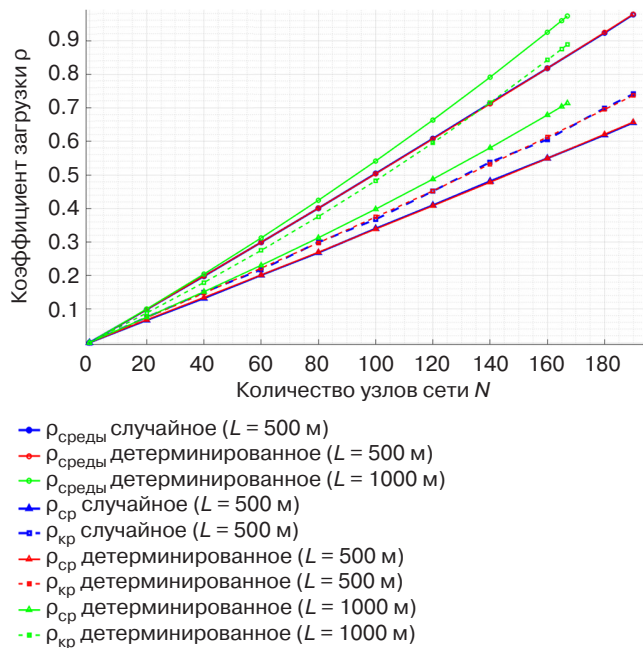


Рис. 5. Зависимость загрузки передающей среды ($\rho_{среды}$), крайнего ($\rho_{кр}$) и среднего ($\rho_{ср}$) узлов сети при детерминированном и случайном распределении узлов при различной длине сети

На рис. 6 показано влияние общего количества сетевых узлов N на величину времени доставки пакетов $T_{\text{достав}}$. Зависимость проанализирована отдельно для пакетов, сгенерированных узлами, расположенными на границе сети, и узлами, находящимися в ее центре. Во всех экспериментах интенсивность нагрузки, создаваемой каждым узлом, была фиксированной и равнялась $\lambda_i = 1200$ пак/с. График позволяет оценить, как выбор топологии сети – детерминированное или случайное распределение узлов – влияет на задержки передачи данных при изменении масштаба системы.

Как видно из графиков, тип распределения узлов (случайный или детерминированный) несущественно влияет на временные характеристики при масштабировании сети. В критической области функционирования ($N = 190$) время передачи пакетов существенно меньше, чем в критической области функционирования при интенсивности поступления пакетов $\lambda_n = 1800$ пак/с, $n = \overline{1, N}$. Установлено, что критическое значение числа узлов сети составляет $N = 110$. При достижении этого порога наблюдается переход системы в режим насыщения, характеризующийся изменением соотношения между нагрузкой на узлы и на канал передачи данных. Анализ полученных зависимостей (рис. 2 и 6) показал, что при перегрузке передающей среды различие во временных характеристиках передачи пакетов между периферийными и центральными узлами существенно меньше, чем в случае перегрузки крайних узлов сети. Это свидетельствует о том, что при высоких нагрузках канал передачи данных становится определяющим фактором, выравнивающим задержки по всей длине сети. Отсюда следует вывод, что при масштабировании промышленной сети следует соблюдать принцип сбалансированности, т.е. загрузка среды передачи и загрузка узлов должны меняться с учетом возникающих конфликтов примерно одинаково. Для этого необходимо не только выбрать интенсивности потоков, поступающих в узлы, таким образом, чтобы загрузка центральных узлов соответствовала загрузке передающей среды, но и на 10–15% снизить интенсивность потоков пакетов, поступающих на обработку из крайних узлов, по сравнению с центральными узлами.

Согласно данным рис. 7, производительность λ_{tot} промышленной сети демонстрирует ожидаемую зависимость от масштаба – она снижается с ростом количества узлов N . Однако ключевым результатом является то, что тип топологии (как случайное, так и детерминированное эквидистантное распределение узлов) не оказывает существенного влияния на величину производительности. Этот вывод подтверждается

графиками, построенными для интенсивности входящего трафика $\lambda_n = 1200$ пак/с, и указывает на доминирующую роль общего числа узлов, а не их пространственного расположения, в формировании пропускной способности сети.

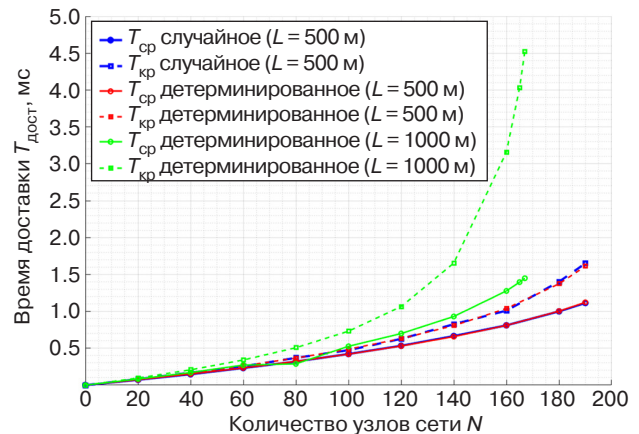


Рис. 6. Время доставки пакетов, поступающих из среднего ($T_{\text{ср}}$) и крайнего ($T_{\text{кр}}$) узлов при случайном и детерминированном распределении узлов при различной длине сети

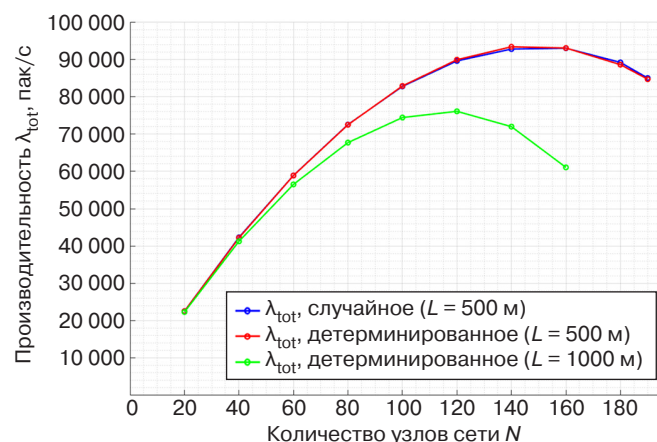


Рис. 7. Производительность сети λ_{tot} при случайном и детерминированном эквидистантном распределении узлов сети при различной длине сети и интенсивности поступления пакетов в узлы сети $\lambda_i = 1200$ пак/с, $i = \overline{1, N}$

Падение производительности в критической области функционирования, обусловленное большой загрузкой передающей среды, при $N = 160$ – 190 (рис. 7) выражено значительно слабее, чем в критической области, обусловленной большой загрузкой крайних узлов при $N = 90$ – 110 (рис. 4). Это обусловлено тем, что временные характеристики передачи пакетов с учетом возникающих конфликтов возрастают более резко при большой загрузке крайних узлов (рис. 2) по сравнению с большой загрузкой передающей среды (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена оценка производительности и вероятностно-временных характеристик промышленных сетей со случайным множественным доступом с учетом ограничений на время передачи пакетов. Сформулирована и доказана теорема о преобразовании Лапласа – Стилтеса функции распределения времени передачи пакетов с учетом возникающих конфликтов.

Проведен анализ процессов передачи информации в промышленных сетях со случайным множественным доступом, включая изменение количества рабочих станций и интенсивности потоков пакетов, поступающих в узлы сети. Для автоматизации исследований и оценки различных режимов работы сети при ее масштабировании и увеличении нагрузки на узлы разработан и реализован комплекс программ.

Проведенное моделирование показало, что на начальных этапах масштабирования сети, сопровождающихся увеличением числа активных узлов, наблюдается рост ее общей производительности за счет более эффективного использования доступной пропускной способности канала. Однако при дальнейшем увеличении интенсивности трафика и загрузки как узлов, так и передающей среды, производительность системы начинает снижаться. При этом наблюдается резкое возрастание задержек при передаче пакетов, что свидетельствует о снижении эффективности обмена данными при высокой плотности сетевого трафика. Дополнительно установлено, что узлы, расположенные на периферии сети, характеризуются более быстрым

ростом времени передачи пакетов и уровня загрузки по сравнению с центральными элементами топологии. Это обусловлено увеличением вероятности коллизий и интерференции сигналов, возникающих вследствие одновременных попыток передачи данных на граничных участках сети.

Проведенные исследования показали, что производительность и временные характеристики с учетом возникающих конфликтов при увеличении количества узлов несущественно зависят от типа распределения узлов – случайного или детерминированного эквидистантного, однако существенно зависят от длины сети. Показано, что временные характеристики передачи пакетов с учетом возникающих конфликтов возрастают более резко при большой загрузке крайних узлов по сравнению с большой загрузкой передающей среды.

Выполненные исследования позволяют сделать вывод о том, что при масштабировании промышленной сети следует соблюдать принцип сбалансированности, т.е. загрузка среды передачи и загрузка узлов должны меняться с учетом возникающих конфликтов примерно одинаково. Для этого необходимо не только выбрать интенсивности потоков, поступающих в узлы, таким образом, чтобы загрузка центральных узлов соответствовала загрузке передающей среды, но и на 10–15% снизить интенсивность потоков пакетов, поступающих на обработку из крайних узлов, по сравнению с центральными узлами.

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жматов Д.В., Леонтьев А.С. Анализ процессов передачи информации в многомодовых оптоволоконных сетях с маркерным методом доступа. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):41–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-41-50>
2. 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.
3. Леонтьев А.С., Жматов Д.В. Исследование вероятностно-временных характеристик беспроводных сетей с методом доступа CSMA/CA. *Russian Technological Journal*. 2024;12(2):67–76. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-67-76>
4. Ferguson C., Kleinrock L. Optimal Update Times for Stale Information Metrics Including the Age of Information. *IEEE Journal on Selected Areas in Information Theory*. 2023;4:734–746. <https://doi.org/10.1109/JSAIT.2023.3344760>
5. He Z., Kleinrock L. Optimization of Assisted Search Over Server-Mediated Peer-to-peer Networks. In: *GLOBECOM 2022 – 2022 IEEE Global Communications Conference*. Rio de Janeiro, Brazil. 2022. P. 4928–4934. <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM48099.2022.10000846>
6. Sapna, Sharma M. Performance evaluation of a wired network with & without Load Balancer and Firewall. In: *2010 International Conference on Electronics and Information Engineering*. Kyoto, Japan. 2010. P. V2-515–V2-519. <https://doi.org/10.1109/ICEIE.2010.5559755>

7. Смирнова Е.В. *Технологии современных сетей Ethernet. Методы коммутации и управления потоками данных*. М.: БХВ-Петербург; 2017, 480 с.
8. Иваничкина Л.В., Непорада А.Л. Модель надежности распределенной системы хранения данных в условиях явных и скрытых дисковых сбоев. *Труды Института системного программирования РАН*. 2015;27(6):253–274. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2015-27\(6\)-16](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-16)
9. Wei M., Chen Z. Study of LANs access technologies in wind power system. In: *IEEE PES General Meeting*. Minneapolis, MN, USA. 2010. <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5590088>
10. Альшаев И.А., Лаврухин В.А. О проектировании и оптимизации сетей Wi-Fi. *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2016;4(1):87–95. <https://www.elibrary.ru/wbdxht>
11. 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>
12. Талалаев А.А., Фроленко В.П. Отказоустойчивая система организации высокопроизводительных вычислений для решения задач обработки потоков данных. *Программные системы: Теория и приложения*. 2018;9(1-36):85–108. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2018-9-1-85-108>
13. 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>
14. Ahmed W., Wu Y.W. A survey on reliability in distributed systems. *J. Comput. System Sci.* 2013;79(8):1243–1255. <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2013.02.006>
15. Бахарева Н.Ф. Анализ производительности сетевых структур методами теории массового обслуживания. *Информатика, телекоммуникации и управление*. 2009;3(80):25–34. <https://www.elibrary.ru/kxxbqv>
16. 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. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2021-15-7-28-33>

REFERENCES

1. Zhmatov D.V., Leontyev A.S. Analysis of information transmission processes in multimode fiber-optic networks with a token-based access method. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):41–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-41-50>
2. 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.).
3. Leontyev A.S., Zhmatov D.V. Study of the probabilistic and temporal characteristics of wireless networks using the CSMA/CA access method. *Russian Technological Journal*. 2024;12(2):67–76. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-67-76>
4. Ferguson C., Kleinrock L. Optimal Update Times for Stale Information Metrics Including the Age of Information. *IEEE Journal on Selected Areas in Information Theory*. 2023;4:734–746. <https://doi.org/10.1109/JSAIT.2023.3344760>
5. He Z., Kleinrock L. Optimization of Assisted Search Over Server-Mediated Peer-to-peer Networks. In: *GLOBECOM 2022 – 2022 IEEE Global Communications Conference*. Rio de Janeiro, Brazil. 2022. P. 4928–4934. <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM48099.2022.10000846>
6. Sapna, Sharma M. Performance evaluation of a wired network with & without Load Balancer and Firewall. In: *2010 International Conference on Electronics and Information Engineering*. Kyoto, Japan. 2010. P. V2-515–V2-519. <https://doi.org/10.1109/ICEIE.2010.5559755>
7. Smirnova E.V. *Tekhnologii sovremennykh setei Ethernet. Metody kommutatsii i upravleniya potokami dannykh (Technologies of Modern Ethernet Networks. Methods of Switching and Data Flow Control)*. Moscow: BHV-Peterburg; 2017, 480 p. (in Russ.).
8. Ivaničkina L.V., Neporada A.L. The reliability model of a distributed data storage in case of explicit and latent disk faults. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN = Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2015;27(6):253–274 (in Russ.). [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2015-27\(6\)-16](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-16)
9. Wei M., Chen Z. Study of LANs access technologies in wind power system. In: *IEEE PES General Meeting*. Minneapolis, MN, USA. 2010. <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5590088>
10. Alshaev I.A., Lavrukhin V.A. Wi-Fi networks design and optimization. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii = Telecom IT*. 2016;4(1):87–95 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/wbdxht>
11. 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>
12. Talalaev A.A., Frolenko V.P. Fault-tolerant system for organizing high-performance computing for solving data stream processing problems. *Programmnye sistemy: Teoriya i prilozheniya = Program Systems: Theory and Applications*. 2018;9(1-36): 85–108 (in Russ.). <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2018-9-1-85-108>
13. 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>

14. Ahmed W., Wu Y.W. A survey on reliability in distributed systems. *J. Comput. System Sci.* 2013;79(8):1243–1255. <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2013.02.006>
15. Bakhareva N.F. Performance analysis of network structures by methods of queuing theory. *Informatika, telekommunikatsii i upravlenie = Computing, Telecommunication and Control.* 2009;3(80):25–34 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/kxxbqv>
16. Sharafullina A.Yu., Galyamov R.R., Zaripova R.S. Technical principles for creating a wireless local network Wi-Fi. *T-Comm: Telekommunikatsiya i transport = T-Comm.* 2021;15(7):28–33 (in Russ.). <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2021-15-7-28-33>

Об авторах

Леонтьев Александр Савельевич, к.т.н., старший научный сотрудник, доцент, кафедра 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, кафедра 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.), 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>