

УДК 519.95:621.3

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-41-50>

EDN KVUAJF



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ процессов передачи информации в многомодовых оптоволоконных сетях с маркерным методом доступа

Д.В. Жматов[@], А.С. Леонтьев

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: zhmatov@mirea.ru

• Поступила: 10.02.2025 • Доработана: 17.03.2025 • Принята к опубликованию: 22.07.2025

Резюме

Цели. Целью работы являются разработка и анализ математической модели передачи информации в многомодовых оптоволоконных кольцевых сетях с маркерным методом доступа для обеспечения эффективного взаимодействия устройств интернета вещей (Internet of Things, IoT). Работа направлена на оценку вероятностно-временных характеристик, надежности и производительности сетевой инфраструктуры, а также оптимизацию параметров передачи данных с учетом специфики IoT и особенностей оптоволоконной среды.

Методы. В ходе исследования применены методы теории надежности для оценки устойчивости сети к отказам и увеличения ее эксплуатационной эффективности, методы теории случайных процессов для моделирования динамики передачи данных в условиях изменяющейся нагрузки, а также методы теории массового обслуживания для анализа распределения трафика и управления очередями пакетов. Дополнительно использовано преобразование Лапласа – Стильтьеса, позволяющее вывести функциональные уравнения, описывающие вероятностно-временные характеристики передачи данных и обеспечивающие точное математическое моделирование сетевых процессов.

Результаты. Исследованы процессы передачи информации в многомодовых оптоволоконных сетях с маркерным доступом в контексте IoT-систем. Проведен анализ временных характеристик передачи пакетов различных классов, включая критически важные данные IoT-устройств.

Выводы. Результаты исследования подтверждают, что многомодовая оптоволоконная среда является эффективной основой для IoT-инфраструктуры, обеспечивая высокую пропускную способность и устойчивость к отказам. Включение характеристик надежности в модель позволило учесть влияние отказов оптоволоконной среды и узлов сети на производительность. Оптимизация параметров маркерного метода доступа, включая временные интервалы и политику передачи маркеров, существенно повышает общую производительность сети, снижая вероятность коллизий, и увеличивает пропускную способность. Разработанная математическая модель предоставляет эффективный инструмент для анализа и проектирования локальных сетей на основе многомодовых оптоволоконных технологий. Это особенно важно для сетей, обслуживающих критически важные инфраструктуры.

Ключевые слова: FDDI-сети, маркерный метод доступа, модели, временные характеристики, отказы, производительность

Для цитирования: 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>, <https://www.elibrary.ru/KVUAJF>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Analysis of information transmission processes in multimode fiber-optic networks with a token-based access method

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

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

• Submitted: 10.02.2025 • Revised: 17.03.2025 • Accepted: 22.07.2025

Abstract

Objectives. The study sets out to develop and analyze a mathematical model for information transmission in multimode fiber-optic ring networks using a token-based access method to ensure efficient interaction between Internet of Things (IoT) devices. The work aims to evaluate the probabilistic and time-related characteristics, as well as the reliability and performance of the network infrastructure to optimize data transmission parameters, taking into account the specifics of IoT and the peculiarities of the fiber-optic medium.

Methods. Reliability theory methods are used to assess the network's resilience to failures and increase its operational efficiency, along with techniques from the theory of stochastic processes to model the dynamics of data transmission under varying loads and approaches from queueing theory to analyze traffic distribution and packet queue management. The Laplace–Stieltjes transform is applied to derive functional equations that describe the probabilistic and time-related data transmission characteristics, enabling precise mathematical modeling of network processes.

Results. The information transmission processes occurring in multimode fiber-optic networks with token access in the context of IoT systems were studied. The temporal characteristics of packet transmission for different classes, including critical IoT device data, were analyzed.

Conclusions. The results confirm that multimode fiber-optic media provide an efficient foundation for IoT infrastructure that offers both high throughput and fault tolerance. By incorporating reliability characteristics into the model, it was possible to account for the impact of fiber-optic medium and network node failures on performance. Optimizing the parameters of the token-based access method, including time intervals and token transmission policies, significantly improves overall network performance by reducing collision probability and increasing throughput. The developed mathematical model provides an effective tool for analyzing and designing local networks based on multimode fiber-optic technologies. This fact is especially important for networks serving critical infrastructure.

Keywords: FDDI networks, token-based access method, models, temporal characteristics, failures, performance

For citation: 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>, <https://www.elibrary.ru/KVUAJF>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Многомодовые методы доступа относятся к технике передачи данных в оптоволоконных системах, которые широко применяются для увеличения пропускной способности и эффективности передачи информации. Основная идея заключается в том, что световые сигналы передаются одновременно через несколько независимых мод – различных траекторий распространения света внутри волоконного сердечника. Это позволяет организовать параллельную передачу данных, при этом каждая мода выступает в роли независимого канала связи.

Многомодовые методы доступа, особенно в системах с высокой пропускной способностью, позволяют эффективно масштабировать объемы передаваемых данных. При увеличении числа мод или пропускной способности каждой моды такие системы находят применение в высокоскоростных оптических сетях, включая магистральные каналы связи и локальные сети.

Характеристики систем обработки и передачи данных в сетевых структурах во многом определяются надежностью передающей среды, включая возможные отказы и сбои [1–3]. Однако во многих исследованиях временные параметры передачи рассматриваются изолированно, без учета факторов надежности, тогда как анализ отказоустойчивости зачастую не включает в себя влияние технологий обработки и передачи информации. Поэтому при исследовании многомодовых оптоволоконных передающих систем для оценки временных характеристик используются разработанные авторами математические методы, учитывающие отказы передающей среды. В [1, 2] авторами разработаны математические методы для анализа вероятностно-временных характеристик передачи данных в сетях с маркерным методом доступа, учитывающие влияние отказов, а также методы оценки загрузки ресурсов и производительности таких сетевых структур. Благодаря своей универсальности и потенциалу, многомодовые методы доступа становятся важным инструментом для построения высокоскоростных оптических сетей, включая магистральные каналы связи, дата-центры и локальные вычислительные сети [4–6]. Эти технологии обеспечивают гибкость масштабирования путем увеличения числа мод, улучшения качества передачи и повышения пропускной способности каждой модуляционной траектории.

1. СТРУКТУРА МНОГОМОДОВОГО ВОЛОКНА

В многомодовом оптоволоконном кабеле диаметр сердечника больше по сравнению с одномодовыми волокнами. Это позволяет свету распространяться через разные моды. Каждая мода представляет собой определенную траекторию распространения света внутри волокна, определяемую законами физики (углом ввода света, свойствами сердечника и оболочки).

При многомодовом методе данные распределяются между доступными модами. Каждая мода действует как отдельный канал связи, обеспечивая независимую передачу данных [7, 8]. Такие методы передачи используют особенности разделения каналов, включая:

- WDM (Wavelength-Division Multiplexing) – мультиплексирование с разделением по длине волны, когда каждой моде выделяется определенная длина волны;
- TDM (Time Division Multiplexing) – мультиплексирование с временным разделением, когда каждая мода передает данные в отведенный временной интервал;
- увеличение пропускной способности без значительного увеличения стоимости оборудования;
- возможность масштабирования системы за счет увеличения числа мод;
- параллельная обработка данных, что особенно важно для высоконагруженных сетей [9–11].

Разные моды проходят через волокно с разной скоростью, что может привести к временному размытию сигнала. Многомодовые волокна обычно используются на коротких расстояниях (например, в локальных сетях) из-за высокой потери сигнала и дисперсии.

Усложнение обработки сигнала заключается в необходимости применения специализированного оборудования, предназначенного для разделения мод, устранения взаимных помех между ними и обеспечения стабильности передачи данных, что требует дополнительной настройки и калибровки системы для достижения оптимального качества сигнала.

В промышленном интернете многомодовые оптоволоконные системы обеспечивают высокоскоростной обмен данными в условиях большого количества подключенных устройств¹ [12–17].

¹ Kleinrock L. To Mario Gerla, the Maestro of Networks. *Ad Hoc Networks*. 2019;88:178–179. <https://www.lk.cs.ucla.edu/data/files/Mario%20Gerla%20tribute%20by%20Len.pdf>. Дата обращения 24.06.2025. / Accessed June 24, 2025.

Многомодовые системы легко интегрируются с различными протоколами передачи данных, включая Ethernet, Fiber Channel². Увеличение числа мод или модернизация системы позволяет без значительных затрат повысить производительность сети.

2. ОГРАНИЧЕНИЯ МНОГОМОДОВОГО МЕТОДА

Передача данных в сети осуществляется с учетом требований к длине пакетов, интенсивности потока данных от каждого узла, а также временных ограничений, задаваемых заказчиком.

Для исследования процесса передачи данных в сети использовался маркерный метод доступа. При этом моделировались различные параметры сети. Варьировались число узлов $N_{уз}$; интенсивность поступления пакетов в узлы сети для каждой моды λ_k , $k = \overline{1, N}$; пропускная способность передающей среды C ; интенсивность отказов передающей среды $\lambda_{от}$; длина передаваемого пакета $L_{пак}$; ограничение на время передачи пакетов каждой моды в сети $T_{дир}^{(1)}$ (директивное время). Определялись следующие параметры для каждой моды: цикл опроса узлов $Z^{(1)}$; загрузки узлов ρ_k , $k = \overline{1, N}$ и передающей среды $R_{сред}$; время доставки пакетов $T_k^{(1)}$; вероятность своевременной доставки пакетов с учетом надежности передающей среды Q_k , $k = \overline{1, N}$; производительность сети $\lambda_{сум}$.

В качестве оценки производительности сети выбирается суммарная интенсивность своевременно обслуженного потока для каждой моды:

$$\lambda_{сум} = \sum_{k=1}^N \lambda_k Q_k.$$

Пусть заданы пропускная способность C , архитектура сети с $N_{уз}$ узлами, N потоков пакетов для каждой моды с интенсивностями λ_k , $k = \overline{1, N}$, и ограничения по времени передачи данных.

Потоки пакетов λ_k для каждой моды и отказы передающей среды $\lambda_{от}$ имеют пуассоновскую природу, а буферные устройства узлов обладают неограниченной емкостью. Количество узлов сети и количество потоков пакетов для каждой моды одинаково.

² Fiber Channel (волоконный канал) – семейство протоколов для высокоскоростной передачи данных. Стандартизацией протоколов занимается Технический комитет T11, входящий в состав Международного комитета по стандартам информационных технологий. [Fiber Channel is a family of protocols for high-speed data transmission. The protocols are standardized by the T11 Technical Committee, part of the International Committee for Information Technology Standards.]

3. ТЕОРЕМА ОБ ОЦЕНКЕ ЦИКЛА ОПРОСА В МАРКЕРНЫХ СЕТЯХ

Цикл опроса узлов сети для каждой моды прямо пропорционален количеству узлов, длине маркера и обратно пропорционален пропускной способности передающей среды и вероятности того, что среда свободна от передачи пакетов данной моды.

При выполнении данных условий теоремы цикл опроса узлов в режиме надежного функционирования описывается следующим соотношением:

$$Z^{(1)} = \frac{N_{уз} \frac{L_M}{C}}{1 - \sum_{k=1}^N \lambda_k \frac{L_{пак}}{C}}, \quad (1)$$

где L_M – длина маркера, а с учетом отказов передающей среды – формулой:

$$Z_{от}^{(1)} = \frac{Z^{(1)}}{1 - \lambda_{от} F_{от}^{(1)}}, \quad (2)$$

где $F_{от}^{(1)}$ – среднее время восстановления работоспособности среды после отказа.

Доказательство. Пусть $T_{пак} = \frac{L_{пак}}{C}$ – время передачи пакета от одного узла к другому. Очевидно, что цикл опроса узлов сети (средний интервал между двумя последовательными опросами узла) равен:

$$Z^{(1)} = \sum_{k=1}^N \left\{ \rho_k \left(\frac{L_{пак}}{C} + \frac{L_M}{C} \right) + (1 - \rho_k) \frac{L_M}{C} \right\} = \sum_{k=1}^N \left\{ \rho_k \frac{L_{пак}}{C} + \frac{L_M}{C} \right\}. \quad (3)$$

В стационарном режиме $\lambda_k Z^{(1)} = \rho_k$. Умножая соотношение (3) на λ_n , $n = \overline{1, N}$, получим систему N линейных неоднородных уравнений относительно ρ_n :

$$\lambda_n \sum_{k=1}^N \left\{ \rho_k \left(\frac{L_{пак}}{C} \right) + \frac{L_M}{C} \right\} = \rho_n. \quad (4)$$

Выберем любые два уравнения для ρ_i и ρ_j :

$$\lambda_i \sum_{k=1}^N \left\{ \rho_k \frac{L_{пак}}{C} + \frac{L_M}{C} \right\} = \rho_i, \quad (5)$$

$$\lambda_j \sum_{k=1}^N \left\{ \rho_k \frac{L_{пак}}{C} + \frac{L_M}{C} \right\} = \rho_j. \quad (6)$$

Умножим уравнение (5) на λ_j , а уравнение (6) на λ_i и вычтем одно уравнение из другого, получим $\rho_i \lambda_j = \rho_j \lambda_i$, следовательно: $\rho_i = \rho_j \frac{\lambda_i}{\lambda_j}$.

Аналогичным образом можно выразить все $\rho_k, k = \overline{1, N}$ через $\rho_1: \rho_k = \rho_1 \frac{\lambda_k}{\lambda_1}$. Подставляя данные соотношения в первое уравнение системы уравнений (4), получим:

$$\lambda_1 \sum_{k=1}^N \left\{ \rho_1 \frac{\lambda_k}{\lambda_1} \frac{L_{\text{пак}}}{C} + \frac{L_M}{C} \right\} = \rho_1, \quad (7)$$

$$\rho_1 \sum_{k=1}^N \left\{ \lambda_k \frac{L_{\text{пак}}}{C} \right\} + \frac{NL_M}{C} \lambda_1 = \rho_1,$$

$$\rho_1 = \frac{N_{\text{уз}} L_M}{C \left(1 - \sum_{k=1}^N \left\{ \lambda_k \frac{L_{\text{пак}}}{C} \right\} \right)} \lambda_1, \quad (8)$$

$$Z^{(1)} = \frac{\rho_1}{\lambda_1} = \frac{N_{\text{уз}} L_M}{C \left(1 - \sum_{k=1}^N \left\{ \lambda_k \frac{L_{\text{пак}}}{C} \right\} \right)}. \quad (9)$$

Загрузка передающей среды равна:

$$R_{\text{сред}} = \sum_{k=1}^N \lambda_k \frac{L_{\text{пак}}}{C}.$$

В стационарном режиме загрузка среды равна вероятности того, что в среде передаются пакеты.

Соответственно, величина $1 - \sum_{k=1}^N \lambda_k \frac{L_{\text{пак}}}{C}$ – вероятность того, что среда свободна от передачи пакетов.

Как видно, формула (9) полностью совпадает с формулой (1), что и доказывает первую часть теоремы о цикле опроса маркерных сетей.

Функциональные уравнения для определения цикла локальных вычислительных систем с маркерным методом доступа с учетом возникающих отказов имеют вид [1]:

$$\begin{cases} Z_{\text{от}}^*(s) = Z^*(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s)), \\ \Gamma_{\text{от}}^*(s) = F_{\text{от}}^*(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s)), \\ \left\{ \begin{aligned} Z_{\text{от}}^*(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st} dZ_{\text{от}}(t), \\ \Gamma_{\text{от}}^*(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st} d\Gamma_{\text{от}}(t), \end{aligned} \right. \quad (10) \\ \left\{ \begin{aligned} Z^*(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s)) &= \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s))t} dZ(t), \\ F_{\text{от}}^*(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s)) &= \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s))t} dF(t), \end{aligned} \right.$$

где $Z_{\text{от}}(t)$ – функция распределения (ФР) цикла локальной вычислительной сети с учетом отказов, $Z(t)$ – ФР цикла локальной вычислительной сети в условиях надежного функционирования, $F_{\text{от}}(t)$ – ФР времени восстановления передающей среды после отказов, $\Gamma_{\text{от}}(t)$ – ФР периода занятости передающей среды после отказов, s – комплексный параметр преобразования Лапласа.

Продифференцируем первое функциональное уравнение (10) по s :

$$\begin{aligned} (Z_{\text{от}}^*(s))' &= \left(\int_0^{\infty} e^{-(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s))t} dZ(t) \right)' = \\ &= - \int_0^{\infty} t e^{-(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s))t} \left(1 - \lambda_{\text{от}} (\Gamma_{\text{от}}^*(s))' \right) dZ(t), \\ \text{при } s \rightarrow 0 \quad (Z_{\text{от}}^*(s))'|_{s=0} &= -Z_{\text{от}}^{(1)}, \\ \lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s)|_{s=0} &= 0, \quad (\Gamma_{\text{от}}^*(s))'|_{s=0} = -\Gamma_{\text{от}}^{(1)}, \\ - \int_0^{\infty} t e^{\{-(s + \lambda_{\text{от}} - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s))t\}} (1 - \lambda_{\text{от}} (\Gamma_{\text{от}}^*(s))') dZ(t)|_{s=0} &= \\ &= -Z^{(1)} (1 + \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^{(1)}). \end{aligned}$$

Следовательно,

$$Z_{\text{от}}^{(1)} = Z^{(1)} (1 + \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^{(1)}). \quad (11)$$

Продифференцировав по s второе функциональное уравнение (10) и найдя предел при $s \rightarrow 0$, получим следующее соотношение для определения среднего значения периода занятости передающей среды после отказа:

$$\Gamma_{\text{от}}^{(1)} = \frac{F_{\text{от}}^{(1)}}{1 - \lambda_{\text{от}} F_{\text{от}}^{(1)}}. \quad (12)$$

Подставляя выражение (12) в соотношение (11), получим:

$$Z_{\text{от}}^{(1)} = \frac{Z^{(1)}}{1 - \lambda_{\text{от}} F_{\text{от}}^{(1)}}. \quad (13)$$

Формула (13) полностью совпадает с формулой (2), что и доказывает вторую часть теоремы о цикле опроса маркерных сетей с учетом отказов.

4. ЗАВИСИМОСТЬ ЦИКЛА ОБСЛУЖИВАНИЯ ПАКЕТОВ ОТ КОЛИЧЕСТВА УЗЛОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПЕРЕДАВАЕМЫХ ПАКЕТОВ

В настоящей работе исследуются процессы передачи информации в многомодовых оптоволоконных передающих средах с помощью разработанных

ранее авторами математических методов расчета сетевых структур с маркерным методом доступа [1]. При расчетах анализировалась четырехмодовая оптоволоконная передающая среда с пропускной способностью 280 Мбит/с для каждой моды. Длина оптоволоконного канала может достигать также, как и в FDDI (Fiber Distributed Data Interface, сети с маркерным методом доступа) сетях, 100 км.

- Длина пакетов, передаваемых с помощью первой моды $L_{\text{пак } 1} = 1024$ бит, ограничение на время передачи пакетов $T_{\text{дир } 1} = 0.00025$ с, интенсивность пакетов, поступающих в сеть от каждого узла $\lambda_{1i} = 2000$ пак/с.
- Длина пакетов, передаваемых с помощью второй моды $L_{\text{пак } 2} = 2048$ бит, ограничение на время передачи пакетов $T_{\text{дир } 2} = 0.0005$ с, интенсивность пакетов, поступающих в сеть от каждого узла $\lambda_{2i} = 1100$ пак/с.
- Длина пакетов, передаваемых с помощью третьей моды $L_{\text{пак } 3} = 4096$ бит, ограничение на время передачи пакетов $T_{\text{дир } 3} = 0.00075$ с, интенсивность пакетов, поступающих в сеть от каждого узла $\lambda_{3i} = 590$ пак/с.
- Длина пакетов, передаваемых с помощью четвертой моды $L_{\text{пак } 4} = 8192$ бит, ограничение на время передачи пакетов $T_{\text{дир } 4} = 0.001$ с, интенсивность пакетов, поступающих в сеть от каждого узла $\lambda_{4i} = 300$ пак/с.

Для управления процессом передачи пакетов различных классов с помощью четырехмодового оптоволоконного кольца использовался маркерный метод доступа. Длина маркера $L_m = 96$ бит, пропускная способность каждой моды 280 Мбит/с. При расчетах предполагалось, что время наработки на отказ передающей среды может принимать значение 10^4 с, 10^5 с, 10^6 с, 10^7 с и ∞ , время восстановления после отказа составляет $T_{\text{вос}} = 60$ с.

При расчетах исследовалась зависимость цикла обслуживания пакетов, загрузки узлов и передающей среды, времени обслуживания пакетов, вероятности своевременного обслуживания пакетов, передаваемых с помощью различных мод, а также производительности многомодовой оптоволоконной сети от количества узлов, подсоединенных

к передающей среде. Соответствующие графики представлены на рис. 1–6.

Зависимость времени обслуживания пакетов в многомодовой кольцевой сети в критической области функционирования (при $N_{\text{уз}} = 110$) от интенсивности отказов представлена в таблице.

Как видно из графиков (рис. 1–6), с увеличением количества узлов (при масштабировании сети) в многомодовой оптоволоконной сети с маркерным методом доступа увеличивается загрузка передающей среды и узлов сети, цикл опроса узлов и время передачи пакетов, передаваемых различными модами, а производительность сети достигает максимального значения и начинает резко падать.

С увеличением интенсивности отказов в критической области функционирования при больших нагрузках передающей среды и узлов резко изменяются все характеристики сети, в частности, время обслуживания пакетов.

Отметим, что максимальная производительность для всех 4 типов передаваемых пакетов достигается при количестве узлов $N_{\text{уз}} = 100$. Количество своевременно переданной информации $V_{\text{пак}}$ максимально при длине пакета $L_{\text{пак}} = 8192$:

$$V_{\text{пак}} = \lambda_{\text{сум}} L_{\text{пак}}.$$

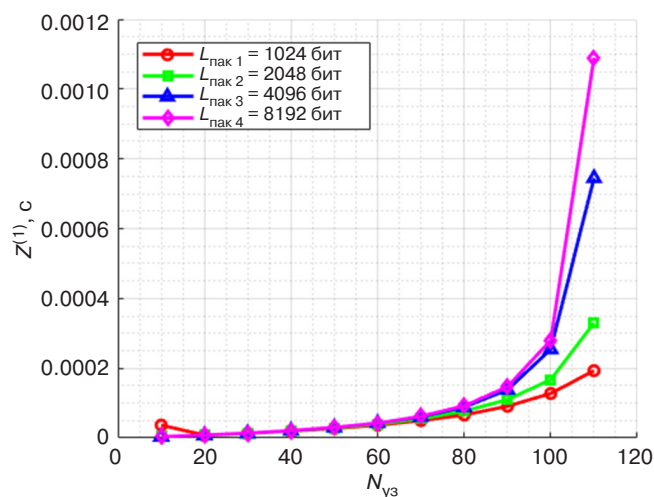


Рис. 1. Зависимость цикла обслуживания $Z^{(1)}$ от количества узлов сети $N_{\text{уз}}$

Таблица. Зависимость времени обслуживания пакетов в многомодовой кольцевой сети от интенсивности отказов

$\lambda_{\text{от}}$	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	Без отказа
$T(L_{\text{пак}} = 1024 \text{ бит}), \text{ с}$	0.003408	0.0004444	0.0001485	0.0001189	0.0001156
$T(L_{\text{пак}} = 2048 \text{ бит}), \text{ с}$	0.003765	0.000552	0.0002312	0.0001991	0.0001955
$T(L_{\text{пак}} = 4096 \text{ бит}), \text{ с}$	0.004485	0.0008598	0.0004978	0.0004617	0.0004576
$T(L_{\text{пак}} = 8192 \text{ бит}), \text{ с}$	0.004669	0.001029	0.0006856	0.0006513	0.0006475

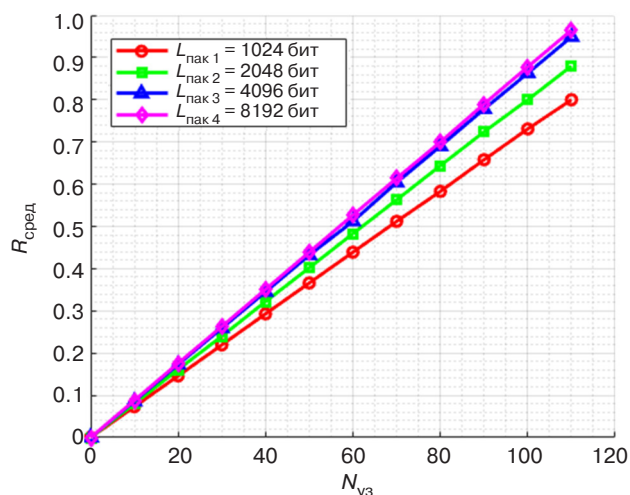


Рис. 2. Зависимость загрузки передающей среды $R_{\text{сред}}$ для каждой моды от количества узлов $N_{\text{уз}}$

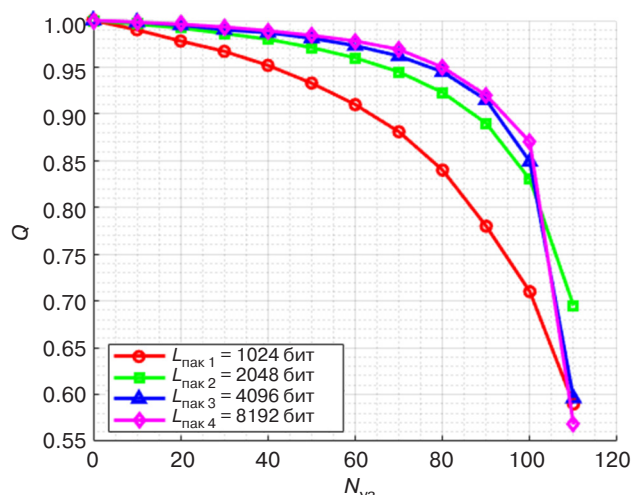


Рис. 5. Зависимость вероятности своевременной передачи пакетов Q в многомодовой кольцевой сети от количества узлов $N_{\text{уз}}$

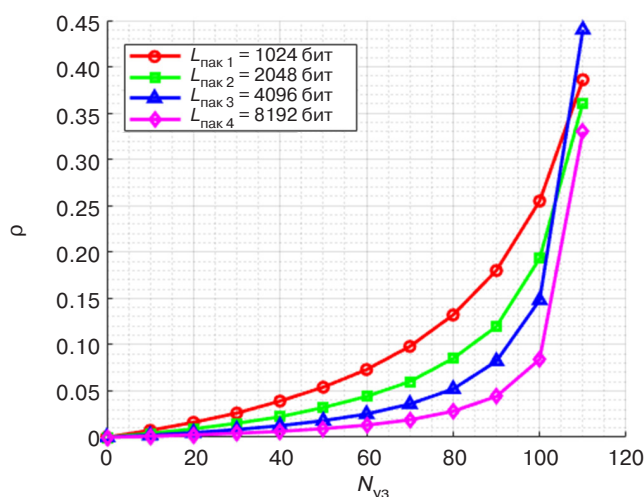


Рис. 3. Зависимость загрузки узлов p от общего количества узлов $N_{\text{уз}}$

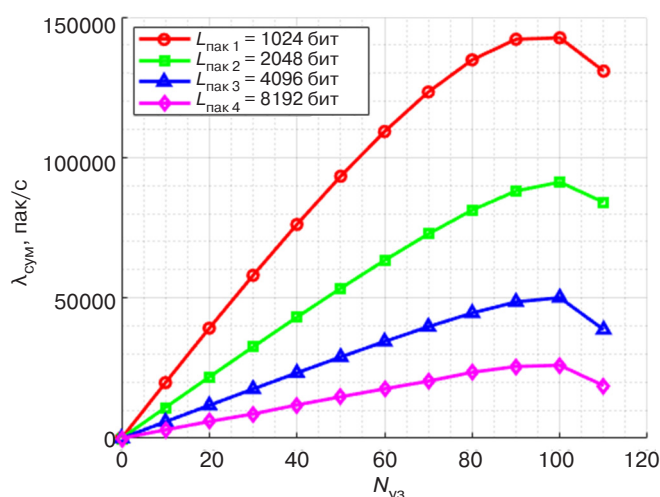


Рис. 6. Зависимость производительности $\lambda_{\text{сум}}$ для каждой моды от количества узлов сети $N_{\text{уз}}$

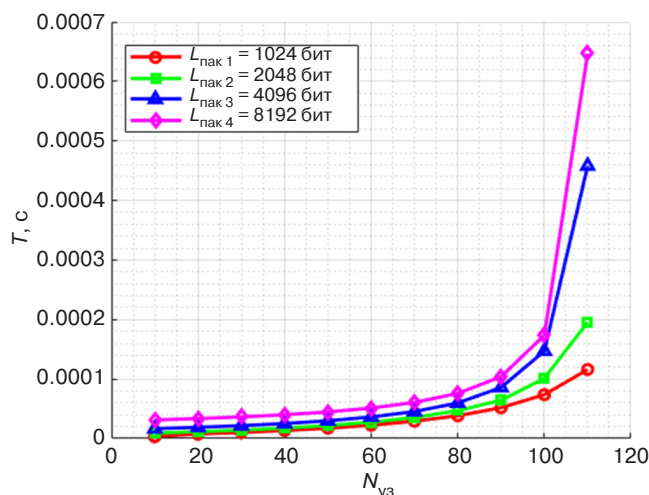


Рис. 4. Зависимость среднего времени обслуживания пакетов 4 типов T в многомодовой оптоволоконной сети с маркерным методом доступа от количества узлов $N_{\text{уз}}$

При высокой интенсивности отказов 10^{-4} время обслуживания пакетов наиболее велико и увеличивается с ростом размера пакета. Для пакета размером 1024 бит среднее время обслуживания составляет 0.003408 с, а для пакета 8192 бит – уже 0.004669 с.

При уменьшении интенсивности отказов до 10^{-5} время обслуживания пакетов значительно сокращается. Для пакета 1024 бит оно уменьшается почти в 8 раз (до 0.0004444 с), а для пакета 8192 бит – более чем в 4 раза (до 0.001029 с).

При интенсивностях отказов 10^{-6} и 10^{-7} время обработки продолжает сокращаться, но не так резко, как при переходе от 10^{-4} к 10^{-5} . Например, для пакета 1024 бит время падает с 0.0001485 с до 0.0001189 с. Это уже менее выраженное уменьшение.

В случае отсутствия отказов время обслуживания оказывается стабильным и значительно ниже, чем при наличии отказов. Например, для всех

пакетов от 1024 до 8192 бит оно меняется в диапазоне 0.0001156–0.0006475 с.

Интенсивность отказов существенно влияет на время обработки пакетов в многомодовой кольцевой сети. При высоких интенсивностях оно значительно увеличивается, особенно для больших пакетов. Однако при снижении интенсивности отказов до 10^{-6} и ниже время обработки приближается к значениям, характерным для сети без отказов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подчеркнуло ключевую роль разработки и анализа математической модели для оптимизации процессов передачи данных в кольцевых сетях, основанных на многомодовой оптоволоконной технологии с маркерным методом доступа. Использование методов теории надежности, случайных процессов и массового обслуживания, а также применение преобразования Лапласа – Стильтеса позволило сформировать точные математические уравнения, обеспечивающие глубокий анализ характеристик сети и выявление ключевых закономерностей ее функционирования.

Разработанная математическая модель учитывает критически важные параметры многомодовой оптоволоконной среды, включая пропускную способность, временные задержки, уровень потерь данных.

В ходе исследования был проведен всесторонний анализ работы многомодовой оптоволоконной сети с маркерным методом доступа, в рамках которого были изучены вероятностные и временные характеристики передачи информации для различных классов пакетов. В частности, были рассмотрены зависимости времени обслуживания пакетов от количества узлов, подсоединенных к передающей среде, а также влияния пропускной способности каждой моды и интенсивности поступления пакетов в сеть. Анализ показал, что с увеличением количества узлов в сети происходит возрастание загрузки передающей среды и узлов, что, в свою очередь, увеличивает цикл обслуживания и время передачи пакетов, а также снижает производительность сети. Кроме того, в критической области функционирования установлено, что повышение интенсивности отказов резко ухудшает характеристики сети, в частности, увеличивается время обслуживания пакетов и снижается вероятность их своевременной передачи.

Особое внимание уделено вопросам надежности сети, а именно влиянию отказов отдельных элементов на ее производительность. Этот аспект имеет

особую значимость для критически важных приложений, где надежность передачи данных определяет успешность работы всей системы. Внедрение характеристик надежности в модель позволило разработать механизмы учета отказов и предложить способы их минимизации, что повышает устойчивость сети к внешним воздействиям и потенциальным сбоям.

Результаты показали, что за счет правильной настройки параметров можно существенно повысить общую производительность сети, снизить вероятность возникновения коллизий и увеличить пропускную способность. Данные выводы подтверждают высокую эффективность предложенных решений и их значимость для повышения качества работы сетей.

Проведенные расчеты и моделирование продемонстрировали, что многомодовая оптоволоконная среда является перспективным решением для организации высокопроизводительных локальных сетей, особенно в условиях повышенных требований к надежности и минимизации потерь информации. Разработанная математическая модель может служить универсальным инструментом для анализа, построения и оптимизации сетей, обеспечивая научно обоснованные рекомендации для их эффективного использования.

Вклад авторов

Д.В. Жматов разработал теоретическую основу исследования, доказав ключевую теорему о цикле опроса в маркерных сетях (формулы 1–13), провел аналитический расчет временных характеристик сети и построил графики зависимостей (рис. 1–6), проанализировал результаты оптимизации маркерного метода доступа и предложил рекомендации для повышения эффективности сети.

А.С. Леонтьев сформулировал постановку задачи, включая требования к передаче данных в сетях, провел численное моделирование параметров сети (загрузки узлов, пропускной способности, вероятности своевременной доставки), определил влияние отказов передающей среды на производительность сети (таблица).

Authors' contributions

D.V. Zhmatov has developed the theoretical framework for the study by proving a key theorem on polling cycles in token-passing networks (Eqs. 1–13), calculated the network timing characteristics analytically and plotted the resulting dependencies (Figs. 1–6), analyzed the optimization results for the token-based access method and proposed recommendations to enhance network efficiency.

A.S. Leontiev has defined the problem statement, including data transmission requirements for networks, performed numerical simulations of network parameters (node load, throughput, and probability of on-time delivery), assessed the impact of transmission medium failures on network performance (Table).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтьев А.С., Жматов Д.В. Аналитический метод анализа процессов передачи сообщений в оптоволоконных сетях с маркерным доступом для цифровых подстанций. *Russ. Technol. J.* 2024;12(6):26–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-6-26-38>
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. 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>
4. 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>
5. Wei M., Chen Z. Study of LANs access technologies in wind power system. In: *IEEE PES General Meeting*. Minneapolis, MN, USA. 2010.
6. 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>
7. Кульба В.В., Мамиконов А.Г., Шелков А.Б. Резервирование программных модулей и информационных массивов в АСУ. *Автоматика и телемеханика*. 1980;8:133–141.
8. 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>
9. Акимов Г.П., Соловьев А.В., Тарханов И.А. Моделирование надежности распределенных вычислительных систем. *Информационные технологии и вычислительные системы (ИТuBC)*. 2019;3:70–86. <https://doi.org/10.14357/20718632190307>
10. 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>
11. Waseem A., Wu Y.W. A survey on reliability in distributed systems. *J. Comput. Syst. Sci.* 2013;79(8):1243–1255. <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2013.02.006>
12. 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)
13. Rothe S., Besser K.L., Krause D., Kuschmierz R., Koukourakis N., Jorswieck E., Czariske J.W. Securing Data in Multimode Fibers by Exploiting Mode-Dependent Light Propagation Effects. *Research*. 2023;6:Article 0065. <https://doi.org/10.34133/research.0065>
14. Ferguson K., Kleinrock L. Optimal update timing of stale information metrics, including age of information. *IEEE Journal on Selected Areas in Information Theory*. 2023;4:734–746. <https://doi.org/10.1109/JSAIT.2023.3344760>
15. He Z., Kleinrock L. Optimization of Assisted Search Over Server-Mediated Peer-to-peer Networks. In: *2022 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2022)*. IEEE. 2022. P. 4928–4934. <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM48099.2022.10000846>
16. Jain R. Error characteristics of fiber distributed data interface (FDDI). *IEEE Trans. Commun.* 1990;38(8):1244–1252. <https://doi.org/10.1109/26.58757>
17. Kleinrock L. Internet congestion control using power metric: *Keep the just full, but no fuller*. *Ad Hoc Networks*. 2018;80:142–157. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.05.015>

REFERENCES

1. Leontyev A.S., Zhmatov D.V. Analytical method for analyzing message transmission processes in FDDI networks for digital substations. *Russ. Technol. J.* 2024;12(6):26–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-6-26-38>
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. 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>
4. 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>

5. Wei M., Chen Z. Study of LANs access technologies in wind power system. In: *IEEE PES General Meeting*. Minneapolis, MN, USA. 2010.
6. 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>
7. Kul'ba V.V., Mamikonov A.G., Shelkov A.B. Redundancy of program modules and data arrays in a MIS. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*. 1980;8:133–141 (in Russ.).
8. 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>
9. Akimova G.P., Solovyev A.V., Tarkhanov I.A. Modeling the reliability of distributed information systems. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Journal of Information Technologies and Computing Systems*. 2019;3:70–86 (in Russ.). <https://doi.org/10.14357/20718632190307>
10. 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>
11. Waseem A., Wu Y.W. A survey on reliability in distributed systems. *J. Comput. Syst. Sci.* 2013;79(8):1243–1255. <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2013.02.006>
12. Ivanichkina 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)
13. Rothe S., Besser K.L., Krause D., Kuschmierz R., Koukourakis N., Jorswieck E., Czarske J.W. Securing Data in Multimode Fibers by Exploiting Mode-Dependent Light Propagation Effects. *Research*. 2023;6:Article 0065. <https://doi.org/10.34133/research.0065>
14. Ferguson K., Kleinrock L. Optimal update timing of stale information metrics, including age of information. *IEEE Journal on Selected Areas in Information Theory*. 2023;4:734–746. <https://doi.org/10.1109/JSAIT.2023.3344760>
15. He Z., Kleinrock L. Optimization of Assisted Search Over Server-Mediated Peer-to-peer Networks. In: *2022 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2022)*. IEEE. 2022. P. 4928–4934. <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM48099.2022.10000846>
16. Jain R. Error characteristics of fiber distributed data interface (FDDI). *IEEE Trans. Commun.* 1990;38(8):1244–1252. <https://doi.org/10.1109/26.58757>
17. Kleinrock L. Internet congestion control using power metric: *Keep the just full, but no fuller*. *Ad Hoc Networks*. 2018;80: 142–157. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.05.015>

Об авторах

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>

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>

About the Authors

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>

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>