

УДК 519.95:621.3

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-6-26-38>

EDN BKJTRZ



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Аналитический метод анализа процессов передачи сообщений в оптоволоконных сетях с маркерным доступом для цифровых подстанций

А.С. Леонтьев,
Д.В. Жматов[@]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Цель работы – разработка аналитических методов оценки вероятностно-временных характеристик и производительности оптоволоконной FDDI-сети (fiber distributed data interface) с маркерным методом доступа, позволяющих автоматизировать процессы передачи сообщений для цифровых электроподстанций.

Методы. Используются методы теории надежности, теории случайных процессов и теории массового обслуживания, преобразование Лапласа – Стильбеса для вывода функциональных уравнений.

Результаты. Проведено численное исследование процессов передачи пакетов между электрическими цифровыми подстанциями (ЦПС) в оптоволоконной сети FDDI. Рассмотрены процессы обмена дискретной информацией между электронными устройствами в системе электрических ЦПС, включая основные технологические операции, выполняемые персоналом системы ЦПС при подготовке отчетов, характеризующих различные режимы работы как отдельных ЦПС, так и всей системы в целом. Получены зависимости загрузки узлов, производительности FDDI-сети и временных характеристик процессов передачи пакетов от интенсивности входных потоков сообщений и надежности передающей среды. Проведен анализ функционирования FDDI-сетей, построенных на основе двух оптоволоконных колец, которые образуют основной и резервный пути передачи данных между узлами сети, что значительно повышает отказоустойчивость таких сетей. Задача исследования включала анализ процессов передачи информации в сетях FDDI с акцентом на обеспечение надежности передающей среды.

Выводы. Выявлено, что существует критическая область функционирования сети, при достижении которой наблюдается резкое увеличение загрузки узлов и временных характеристик, в то время как производительность достигает максимального значения и затем резко снижается. Предложено осуществлять обмен дискретными сообщениями, отражающими состояние электронных устройств, и информационными сообщениями персонала между различными дистанционно разнесенными ЦПС с использованием оптоволоконной сети FDDI.

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

• Поступила: 30.01.2024 • Доработана: 24.04.2024 • Принята к опубликованию: 27.09.2024

Для цитирования: 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>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Analytical method for analyzing message transmission processes in FDDI networks for digital substations

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

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. To develop analytical approaches for the evaluation of probability-time characteristics and fiber distributed data interface (FDDI) network performance with the marker access method, thus enabling communication processes for digital electrical substations to be automated.

Methods. The authors used theory reliability methods, random process theory, mass maintenance theory, the Laplace–Stieltjes transformation for inferring functional equations and the probability-time characteristics calculation for the information transfer processes with the occurring failures.

Results. We conducted a numerical study of packet transfer processes between central processing stations in the FDDI network. We considered the processes of discrete information exchange between electronic devices in the system of electrical digital substations. These included the main technological operations and electrical digital substations operator performed when preparing reports. We described the different modes of operation, both for the individual electrical digital substation and for the system. The authors calculated node loading dependencies, FDDI network performance and temporal characteristics of the packet transfer processes on the incoming message flow intensity and the transmission medium reliability. We conducted a functional analysis of the FDDI networks on two fiber-optic rings which form the main and redundant path of data transfer between the network nodes, significantly increasing network resiliency. The objective of the study was to analyze the information transfer processes in FDDI networks with an accent on ensuring the transmission medium reliability.

Conclusions. We were able to establish the existence of the critical operating network region, which leads to a sharp increase in node load and temporal characteristics, while performance reaches its maximum value and then sharply decreases. We propose the exchange of discrete messages to reflect the electronic devices state and information messages of operator between various remotely spaced electrical digital substation with the FDDI fiber-optic network.

Keywords: digital substations, FDDI networks, token access method, models, time characteristics, failures, performance

• Submitted: 30.01.2024 • Revised: 24.04.2024 • Accepted: 27.09.2024

For citation: 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>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровая подстанция (ЦПС) – это тип электрической подстанции, где все процессы мониторинга, анализа и управления выполняются в едином цифровом формате. Основным звеном для передачи данных в таких подстанциях служит локальная вычислительная сеть (ЛВС), основанная на технологии Ethernet.

Одной из основных задач ЦПС является обмен дискретной информацией между цифровыми электронными устройствами, к которым относятся трансформаторы напряжения и тока [1–4]. Для обмена дискретными сигналами применяется протокол передачи данных GOOSE (generic object-oriented substation event – общее объектно-ориентированное событие на подстанции), описанный в стандарте МЭК 61850¹ [5–7]. GOOSE-модель обеспечивает быстрый механизм передачи событий (например, команд и предупреждений) и используется для отключения, запуска устройств, записи аварийных событий. На этапе проектирования следует учитывать загруженность и пропускную способность трактов передачи данных. Размер GOOSE-сообщения составляет от 573 до 830 байт. Когда сообщение включает в себя 64 дискретных сигнала, размер GOOSE-сообщения с учетом служебной информации (28–30 байт, включая преамбулу, адреса отправителя и получателя, циклический контрольный код, управляющие поля, ограничители, поле статуса) составляет 1 Кбайт. В связи с этим, при моделировании обмена дискретными сигналами между разными ЦПС, подключенными к сети FDDI (fiber distributed data interface – волоконно-оптический распределенный интерфейс передачи данных), синхронный

трафик в сети составляют GOOSE-сообщения размером 1 Кбайт или 8 кбит. Для ускорения процесса разработки и улучшения качества работы системы ЦПС необходимо предложить методы анализа эффективности применяемых информационных технологий, в частности, стандартных технологий подготовки персоналом информационно-аналитических отчетов. Создание математических моделей, описывающих основные этапы и схемы подготовки отчетов, позволяет автоматизировать выбор компонентов системы для реализации различных режимов работы как отдельных ЦПС, так и всей системы в целом, на основе многовариантного анализа. Функционирование отдельных ЦПС основывается на использовании ЛВС типа Fast Ethernet, а для взаимодействия различных ЦПС используется оптоволоконная сеть FDDI.

Основные функциональные задачи, которые ежедневно решает персонал системы ЦПС при подготовке отчетов, описывающих различные режимы работы как отдельных ЦПС, так и всей системы в целом, включают поиск информации по фактографии, контекстный поиск информации, частотный анализ по атрибутам отчетов, сортировку, кластеризацию и семантический анализ.

1. МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ СООБЩЕНИЯ для ЦПС

Максимальная протяженность линий между ЦПС составляет 200 км при условии, что кольцевая часть не превышает 100 км. Максимальное количество узлов двойного подключения ограничено и составляет 500. В соответствии со стандартом МЭК 61850 [1–3] для обмена GOOSE-сообщениями между объектами электроэнергетики предусмотрены два варианта.

Первый вариант (рис. 1) опирается на технологию туннелирования. В данном контексте между объектами формируется широкополосный канал Ethernet, по которому осуществляется передача GOOSE-сообщений с использованием сетевого оборудования.

Второй сценарий, изображенный на рис. 2, включает использование шлюза. В этом варианте предполагается использование устройства передачи

¹ ГОСТ Р МЭК 61850-5-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. *Сети и системы связи на подстанциях*. Часть 5. Требования к связи для функций и моделей устройств. М.: Стандартинформ, 2020. Стандарт описывает форматы потоков данных, виды информации, правила описания элементов энергообъекта и свод правил для организации событийного протокола передачи данных. [GOST R IEC 61850-5-2011. National Standard of the Russian Federation. *Communication networks and systems in substations*. Part 5. Communication requirements for functions and device models. Moscow: Standartinform, 2020. The standard describes data flow formats, types of information, rules for describing the elements of an energy object, and a set of rules for organizing an event-based data transfer protocol (in Russ.).]

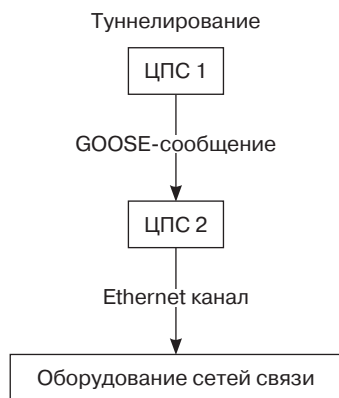


Рис. 1. Технология туннелирования для передачи GOOSE-сообщений между компонентами ЦПС

аварийных сигналов для обмена GOOSE-сообщениями между объектами. Устройства передачи аварийных сигналов и команд выполняют преобразование дискретных сигналов из GOOSE-сообщений в закодированные аналоговые или цифровые сигналы, предназначенные для безопасной передачи команд релейной защиты по каналу ЦПС. На приемной стороне устройства передачи аварийных сигналов и команд генерируют GOOSE-сообщения из полученных по каналу закодированных сигналов.

Для передачи GOOSE-сообщений при использовании туннелирования необходимо наличие цифровых каналов между подстанциями. Они могут быть организованы по цифровым промышленным сетям связи или выделенным оптоволоконным каналам. Однако организация надежных цифровых высокочастотных каналов для GOOSE-сообщений невозможна из-за необходимости передачи команд релейной защиты и противоаварийной автоматики при возникновении короткого замыкания на линиях электропередачи [2–4].

Оптоволоконная сеть FDDI может быть связана с ЦПС для обеспечения эффективной передачи данных в цифровых сетях электропередачи. Цифровые подстанции могут использовать сети FDDI для обмена данными между различными устройствами в электроэнергетической системе, такими как мониторинговые и управляющие системы, системы безопасности, системы управления нагрузкой и другие устройства, требующие быстрой и надежной передачи данных. Подключение сетей FDDI к ЦПС позволяет использовать оптоволоконные кольца для передачи больших объемов данных с высокой скоростью и надежностью, обеспечить высокую пропускную способность, отказоустойчивость и низкую задержку передачи данных, что особенно важно для критически важных систем электропередачи.

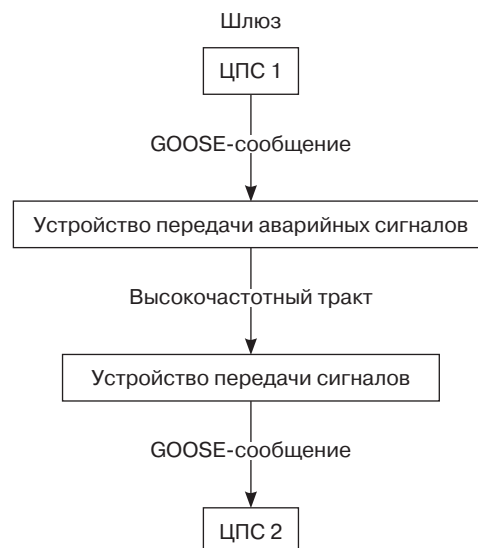


Рис. 2. Использование устройств передачи аварийных сигналов

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АНАЛИТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ FDDI-СЕТИ

При анализе эффективности работы сетей FDDI первостепенным является создание методов, моделей и алгоритмов, которые учитывают особенности передачи данных в этих сетях, включая возможные сбои.

Методы имитационного моделирования для определения временных характеристик компьютерных систем и сетей в условиях сбоев оказываются неэффективными [8]. Известные аналитические методы обычно применимы для анализа локальных структур и, как правило, ориентированы на анализ либо временных характеристик локальных систем с учетом надежности [9–11], либо показателей надежности компьютерных систем и сетей [12–14].

Рассмотрим формулировку задачи и аналитическую модель для оценки временных характеристик и показателей производительности сети FDDI с оптоволоконными кольцами с учетом надежности передающей среды и ограничений на время передачи данных. Такой подход и его реализация расширяют область применения методологии исследования процессов передачи данных в локальных сетях с использованием аналитических методов [15, 16].

Основными показателями в этом контексте являются вероятностно-временные характеристики, которые сильно зависят от сбоев и отказов передающей среды.

Впервые развернутые постановки задач исследования вероятностно-временных характеристик и производительности ЛВС типа Ethernet и ЛВС с маркерным методом доступа, а также аналитические методы их решения были разработаны автором

Леонтьевым А.С. и опубликованы в 2001 г. в работе [15]. Общая постановка задачи исследования вероятностно-временных характеристик и производительности сетей FDDI соответствует методике, описанной в работе [15], и формулируется следующим образом: **определить вероятностно-временные характеристики передачи пакетов, загрузки узлов и передающей среды, а также оценить производительность оптоволоконной сети FDDI при заданных пропускной способности и надежности передающей среды, структуре и количестве узлов FDDI-сети, потоках передаваемой информации и ограничениях на время передачи пакетов.**

Выбранная метрика производительности – это общая интенсивность потока, который был обслужен вовремя. Решение задачи основывается на предположении, что потоки λ_n , $n = \overline{1, N}$, входящие в сеть для обслуживания, и отказы передающей среды имеют пуассоновскую природу. Предусматривается, что ввод данных в узел происходит через аккумулятор с неограниченной емкостью. Как было показано в [15], эти предположения обоснованы при разработке системных режимов работы локальной сети, и точность результатов, полученных с их помощью, приемлема для инженерных расчетов.

3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ FDDI-СЕТИ

Пронумеруем узлы сети в порядке опроса и будем использовать индекс n для обозначения станции (узла) FDDI-сети. Пусть N – количество узлов сети, λ_n – интенсивность потока пакетов, поступающих в n -й узел. Среднее время передачи пакета от одного узла к соседнему узлу определяется соотношением:

$$X^{(1)} = \frac{L_{\text{пак}}}{C},$$

где $L_{\text{пак}}$ – длина пакета, включающего и длину маркера; C – пропускная способность передающей среды.

Очевидно, что средний интервал $Z^{(1)}$ между двумя последовательными опросами узла равен:

$$Z^{(1)} = \sum_{n=1}^N \left\{ \rho_n X^{(1)} + (1 - \rho_n) \frac{L_M}{C} \right\}, \quad n = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где ρ_n – загрузка n -го узла, L_M – длина маркера. В стационарном режиме:

$$\lambda_n Z^{(1)} = \rho_n. \quad (2)$$

Из (1) и (2) получаем:

$$\lambda_n \sum_{n=1}^N \left\{ \rho_n X^{(1)} + (1 - \rho_n) \frac{L_M}{C} \right\} = \rho_n. \quad (3)$$

Система уравнений (3) является неоднородной системой линейных алгебраических уравнений относительно ρ_n .

$$\rho_n = \frac{\lambda_n N \frac{L_M}{C}}{1 - \sum_{k=1}^N \lambda_k \left(X^{(1)} - \frac{L_M}{C} \right)}, \quad n = \overline{1, N}, \quad (4)$$

λ_k – максимальное количество пакетов в узле; k – максимальное количество узлов.

Сравнивая (2) и (4), получаем:

$$Z^{(1)} = \frac{N \frac{L_M}{C}}{1 - \sum_{k=1}^N \lambda_k \left(X^{(1)} - \frac{L_M}{C} \right)}. \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) определяют загрузку узлов сети и средний цикл опроса узлов в условиях надежного функционирования.

Функциональные уравнения для определения цикла сети с маркерным методом доступа с учетом возникающих отказов имеют вид:

$$Z_{\text{от}}^*(s) = Z^*(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} Y_{\text{от}}^*(s)), \quad (6)$$

$$Y_{\text{от}}^*(s) = F_{\text{от}}^*(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} Y_{\text{от}}^*(s)), \quad (7)$$

$$Z_{\text{от}}^*(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dZ_{\text{от}}(t), \quad Y_{\text{от}}^*(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dY_{\text{от}}(t),$$

$$Z^*(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} Y_{\text{от}}^*(s)) = \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} Y_{\text{от}}^*(s))t} dZ(t),$$

$$F_{\text{от}}^*(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} Y_{\text{от}}^*(s)) = \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} Y_{\text{от}}^*(s))t} dF(t),$$

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

Функциональные уравнения (6) и (7) можно получить, используя метод катастроф [9],

в соответствии с методикой, изложенной в работе [15]. Дифференцируя (6) и (7) по s , получим:

$$Y_{от}^{(1)} = \frac{F_{от}^{(1)}}{1 - \lambda_{от} F_{от}^{(1)}}, \quad (8)$$

$$Z_{от}^{(1)} = \frac{Z^{(1)}}{1 - \lambda_{от} F_{от}^{(1)}}. \quad (9)$$

Преобразование Лапласа – Стилтеса ФР времени передачи пакета с учетом возникающих отказов $X_{от}^*(s)$ определяется с помощью следующего функционального уравнения:

$$X_{от}^*(s) = X^*(s + \lambda_{от}) + \frac{\lambda_{от}}{s + \lambda_{от}} (1 - X^*(s + \lambda_{от})) F_{от}^*(s) X_{от}^*(s), \quad (10)$$

где $X^*(s + \lambda_{от}) = \int_0^\infty e^{-(s+\lambda_{от})t} dX(t)$, $X(t)$ – ФР времени передачи пакета по передающей среде в условиях надежного функционирования.

Функциональное уравнение (10) легко получить, воспользовавшись методом катастроф [9].

Моменты $V_n^{(1)}, V_n^{(2)}$ ФР времени обслуживания пакета, поступившего в свободный n -й узел, определяются выражениями:

$$V_n^{(1)} = X_{от}^{(1)} + W_{n|\xi_n=1}^{(1)}, \quad (11)$$

$$V_n^{(2)} = X_{от}^{(2)} + 2W_{n|\xi_n=1}^{(1)} + W_{n|\xi_n=1}^{(2)},$$

где ξ_n – число пакетов в узле n ; $X_{от}^{(1)}, X_{от}^{(2)}$ – моменты ФР $X_{от}(t)$; $W_{n|\xi_n=1}^{(1)}, W_{n|\xi_n=1}^{(2)}$ – 1-й и 2-й моменты ФР времени ожидания прихода маркера в n -й узел при $\xi_n = 1$.

Среднее время ожидания пакетов в очереди на обслуживание в n -м узле FDDI-сети $W_n^{(1)}$ дается формулой Полячека – Хинчина [15]:

$$W_n^{(1)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_n V_n^{(2)}}{1 - \lambda_n V_n^{(1)}}, \quad (12)$$

где $V_n^{(1)}, V_n^{(2)}$ определяются формулами (11).

Среднее время доставки пакетов $T_n^{(1)}$ в сети определяется выражением:

$$T_n^{(1)} = W_n^{(1)} + V_n^{(1)}. \quad (13)$$

Суммарная интенсивность своевременно обслуженного потока пакетов (производительность FDDI-сети) рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{сум} = \sum_{i=1}^N \lambda_i P_i, \quad (14)$$

где P_i – вероятность своевременной доставки пакетов, поступающих в i -й узел FDDI-сети, λ_i – интенсивность поступления пакетов в i -й узел сети.

Аналитические соотношения, необходимые для оценки вероятности P_i своевременной доставки пакетов, поступающих в i -й узел сети с учетом возникающих отказов, представлены в работах [9, 15].

4. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В FDDI-СЕТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Авторами разработан комплекс программ, который позволяет на практике использовать рассмотренную аналитическую модель для оценки эффективности FDDI-сети. Он может быть установлен на сервер FDDI-сети для доступа с рабочих мест.

Аналитический аппарат, реализованный в виде этого комплекса программ, позволяет автоматизированно исследовать структуру и характеристики FDDI-сети с двумя оптоволоконными кольцами, учитывая надежность передающей среды. Экранная форма ввода исходных данных и вывода результатов моделирования показана на рис. 3. Пользователь может вводить исходные данные в диалоговом режиме с помощью заданных форм.

Результаты расчетов выводятся на экран в текстовых и графических окнах. Пользователь может корректировать исходные данные и сохранять результаты расчетов в текстовых и графических файлах без выхода из системы моделирования.

Для демонстрации исследования процессов доставки пакетов и производительности оптоволоконной FDDI-сети с помощью разработанного аналитического метода проведено моделирование передачи пакетов в ней. Для моделирования выбраны следующие исходные данные:

- тип передающей среды – два оптоволоконных кольца;
- тип распределения узлов в сети – случайный;
- количество узлов в сети $N = 100$;
- пропускная способность – 100 Мбит/с;
- время наработки на отказ передающей среды – 100000–1000000 с;
- среднее время восстановления после отказа – 100 с;
- длина маркера – 96 бит;
- директивное время – 1 мс;
- длина синхронного пакета (дискретного GOOSE-сообщения) – 8 кбит;

- интенсивность поступления синхронных пакетов (дискретных GOOSE-сообщений в системе ЦПС) одинакова во всех узлах FDDI-сети (варьируемый параметр).

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 FDDI-сети системы ЦПС с заданными исходными данными при изменении нагрузки представлены на рис. 4–10.

Время доставки пакетов в FDDI-сети зависит от времени ожидания передачи в очереди на узлах сети и времени передачи пакета. Поэтому параметры обработки информации в сети должны выбираться таким образом, чтобы во всем диапазоне изменения интенсивности потоков обрабатываемых пакетов не возникало узких мест в системе, 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 интенсивности

отказов и уменьшением количества узлов при заданной пропускной способности передающей среды длина передаваемых пакетов должна увеличиваться таким образом, чтобы сеть была сбалансированной при увеличении нагрузки.

Отметим, что с увеличением интенсивности отказов в FDDI-сети и увеличением количества узлов для заданной пропускной способности сети для сбалансированности сети во всем диапазоне изменения нагрузки, и для получения оптимальной производительности, необходимо уменьшать длину передаваемых информационных пакетов, т.к. при этом будет уменьшаться вероятность возникновения искажений.

Как видно из графиков (рис. 4–9), с увеличением интенсивности потоков пакетов, обслуживаемых в FDDI-сети, увеличивается загрузка узлов, цикл опроса узлов и временные характеристики, а производительность сети (суммарный своевременно обслуженный поток пакетов в сети) достигает максимального значения и начинает резко падать. С увеличением интенсивности отказов передающей среды область резкого изменения характеристик FDDI-сети сдвигается в сторону меньших нагрузок.

Исходные данные				Узел		График			
Режим функционирования ЛВС: безотказный? Да / Нет				1	1	Загрузка передающей среды (Ro cp)			
1. Количество узлов локальной сети : N= 100				2	1	Средний цикл опроса узлов ЛВС (V1)			
2. Пропускная способность среды : C[бит/с]= 100000000				3	1	Загрузка узла (Ro уз)			
3. Длина маркера : Lm[бит]= 96				4	1	Ср.вр. ожид. передачи пакета пост. в пустой			
4. Длина пакета : Lпак[бит]= 8000				5	1	Ср.вр. ожид. пакета в очереди на узле (W11)			
5. Ограничение времени передачи : Tогр[с]= 0,001				6	1	Ср.вр. обслуживания пакета в ЛВС (TV)			
6. Время наработки на отказ : Tот[с]= 1000000				7	1	Вероятность обработки в директивные сроки			
7. Время восстановления : Tвос[с]= 100				8	1	Производительность ЛВС (AMC)			
				9	1				
				10	1				
Расчет						Сохранить			
Результаты вычислений для узла № 2:									
Lamb	Ro cp	V1	Ro уз	W1	W11	TV	Q	AMC	
1	0.00800000	0.00009677	0.00009677	0.00004838	0.00000080	0.00012919	0.94158786	94.94158786	
2	0.01600000	0.00009756	0.00019512	0.00004877	0.00000161	0.00013039	0.94121321	188.18824264	
3	0.02399999	0.00009836	0.00029508	0.00004916	0.00000242	0.00013160	0.94083268	282.28224980	
4	0.03200000	0.00009917	0.00039669	0.00004957	0.00000323	0.00013281	0.94044613	376.37617845	
5	0.04000000	0.00010000	0.00050000	0.00004997	0.00000404	0.00013403	0.94005342	470.47002671	
6	0.04799999	0.00010084	0.00060504	0.00005039	0.00000485	0.00013526	0.93965439	563.56379263	
7	0.05600000	0.00010169	0.00071186	0.00005081	0.00000566	0.00013649	0.93924889	657.65747422	
8	0.06400000	0.00010256	0.00082051	0.00005124	0.00000647	0.00013773	0.93883676	751.75106941	
9	0.07200000	0.00010344	0.00093103	0.00005168	0.00000729	0.00013898	0.93841783	844.84457604	
10	0.08000000	0.00010434	0.00104347	0.00005213	0.00000810	0.00014024	0.93799192	937.93799192	

Рис. 3. Экранная форма ввода исходных данных и вывода результатов моделирования.
AMC – производительность ЛВС (automatic message counting)

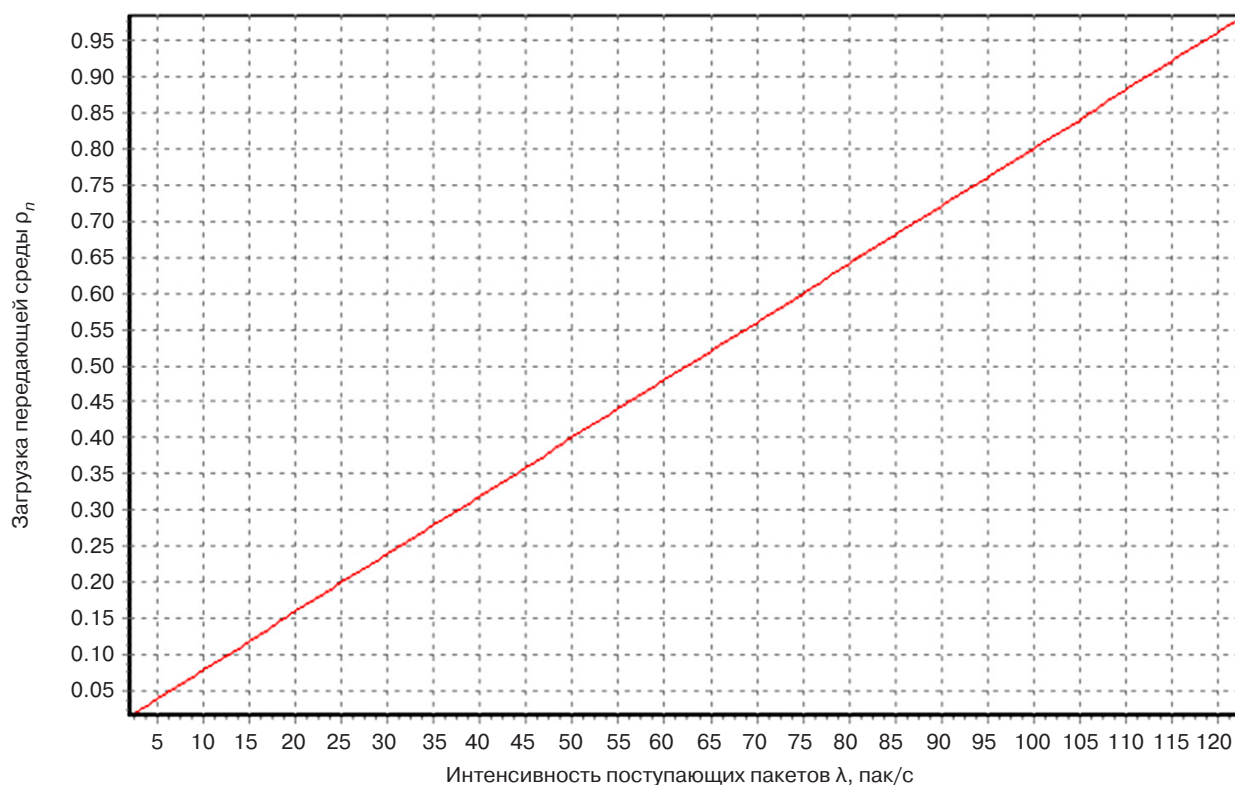


Рис. 4. Зависимость загрузки передающей среды оптоволоконной FDDI-сети системы ЦПС от интенсивности поступления синхронных пакетов в узлы

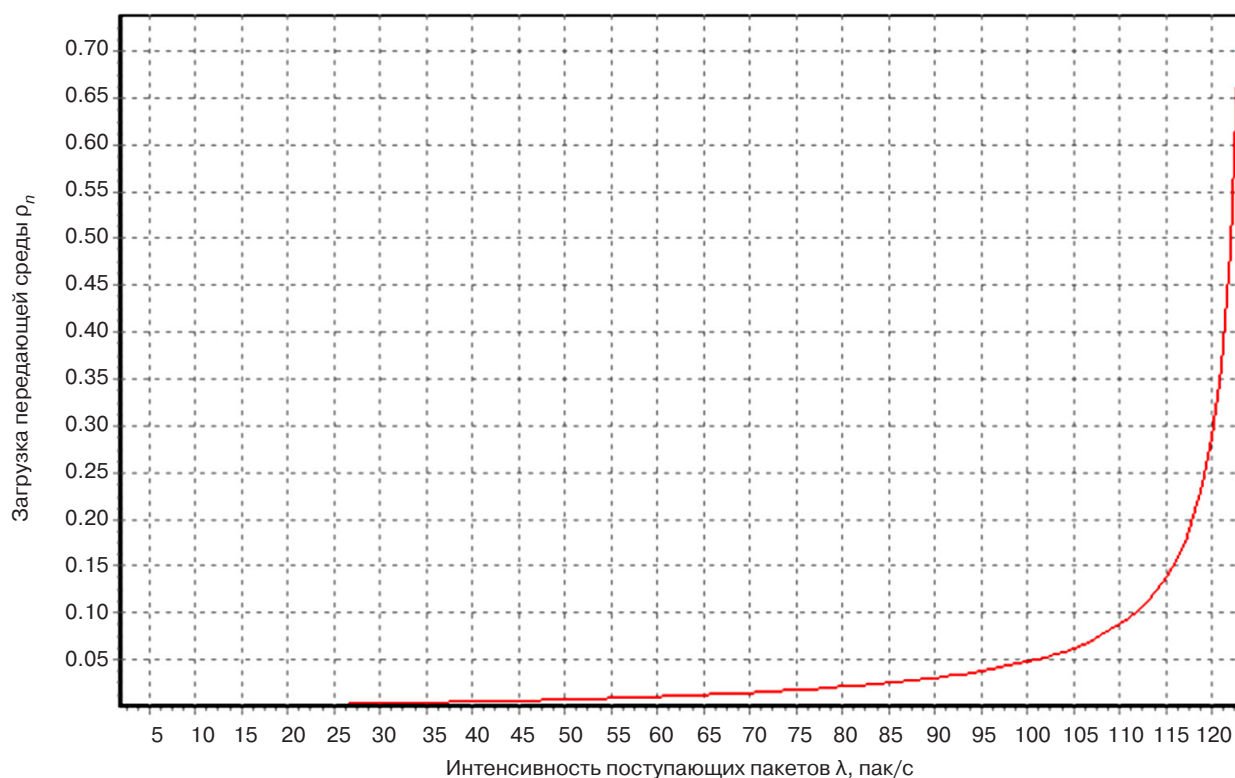


Рис. 5. Зависимость загрузки узлов FDDI-сети системы ЦПС от интенсивности поступления синхронных пакетов в узлы

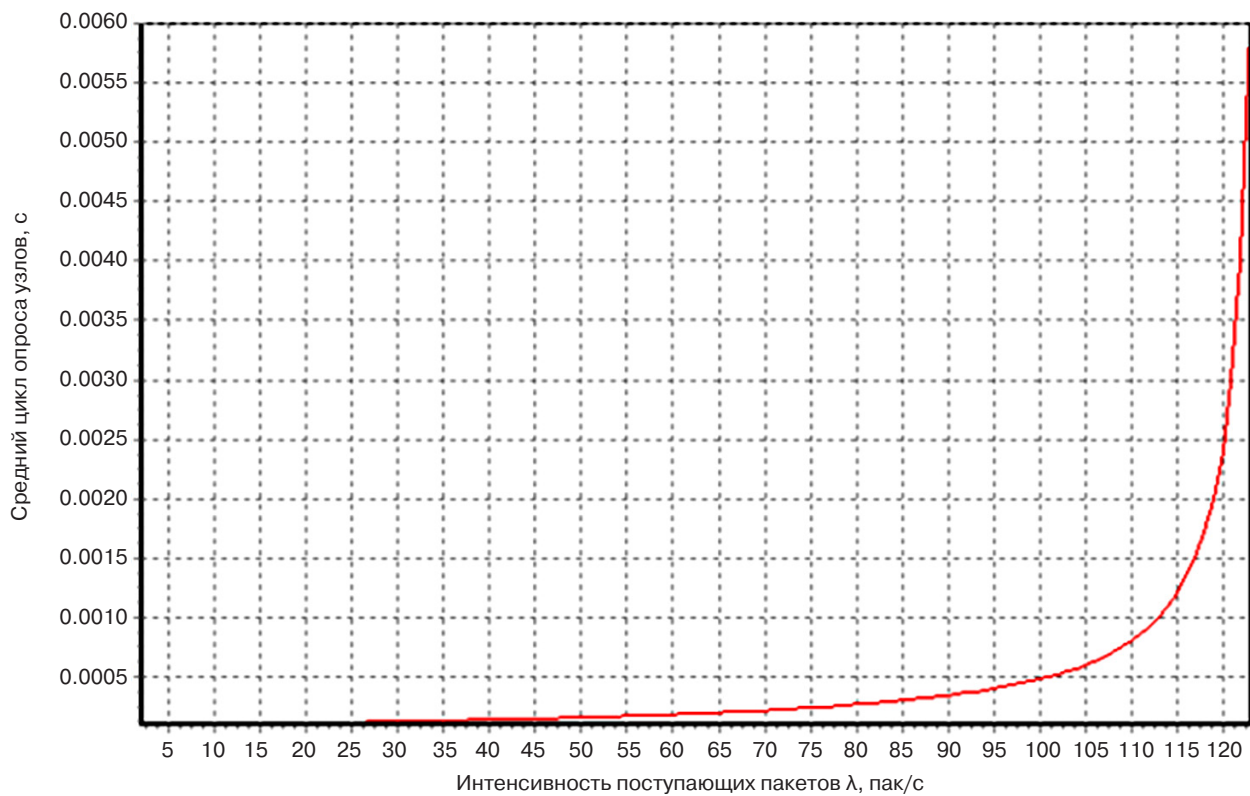


Рис. 6. Зависимость среднего цикла опроса узлов FDDI-сети системы ЦПС от интенсивности поступления синхронных пакетов в узлы

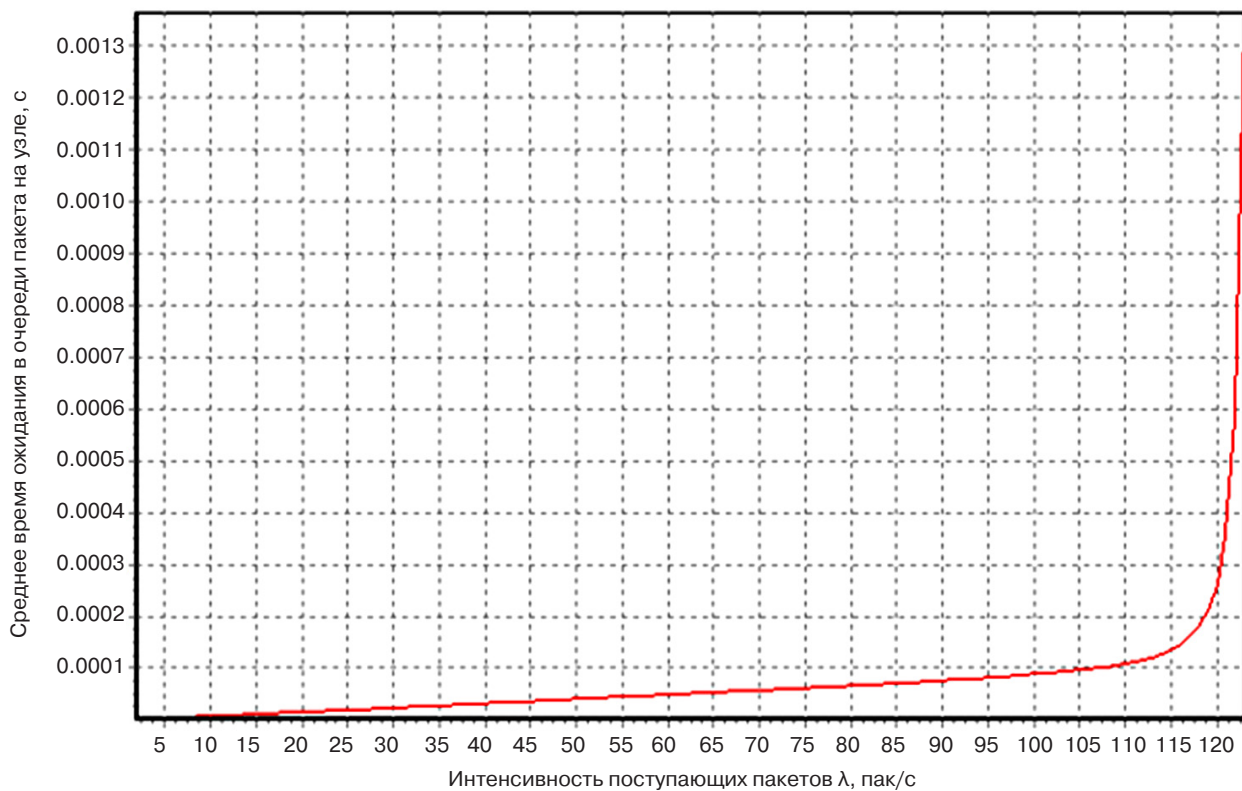


Рис. 7. Зависимость времени ожидания начала передачи синхронного пакета в очереди на узле FDDI-сети системы ЦПС от интенсивности поступления синхронных пакетов

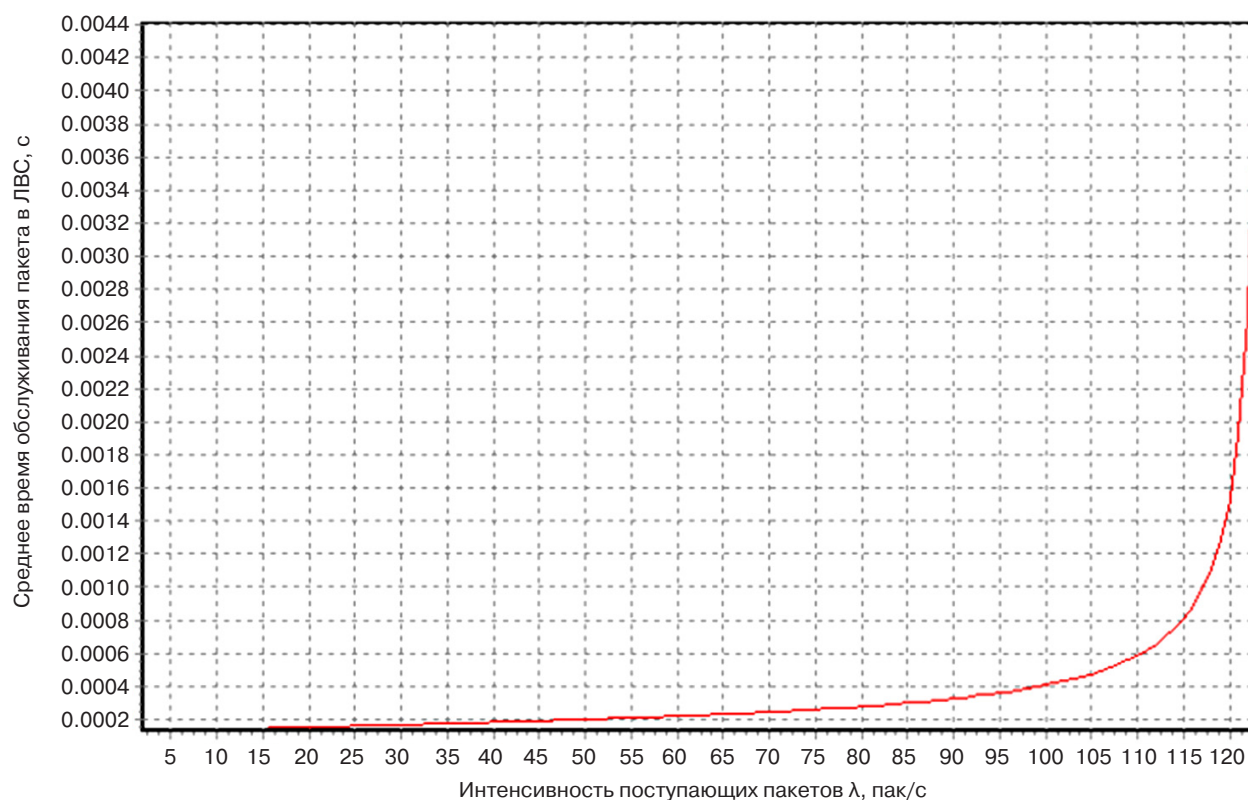


Рис. 8. Зависимость среднего времени обслуживания синхронных пакетов в FDDI-сети системы ЦПС от интенсивности поступления синхронных пакетов в узлы

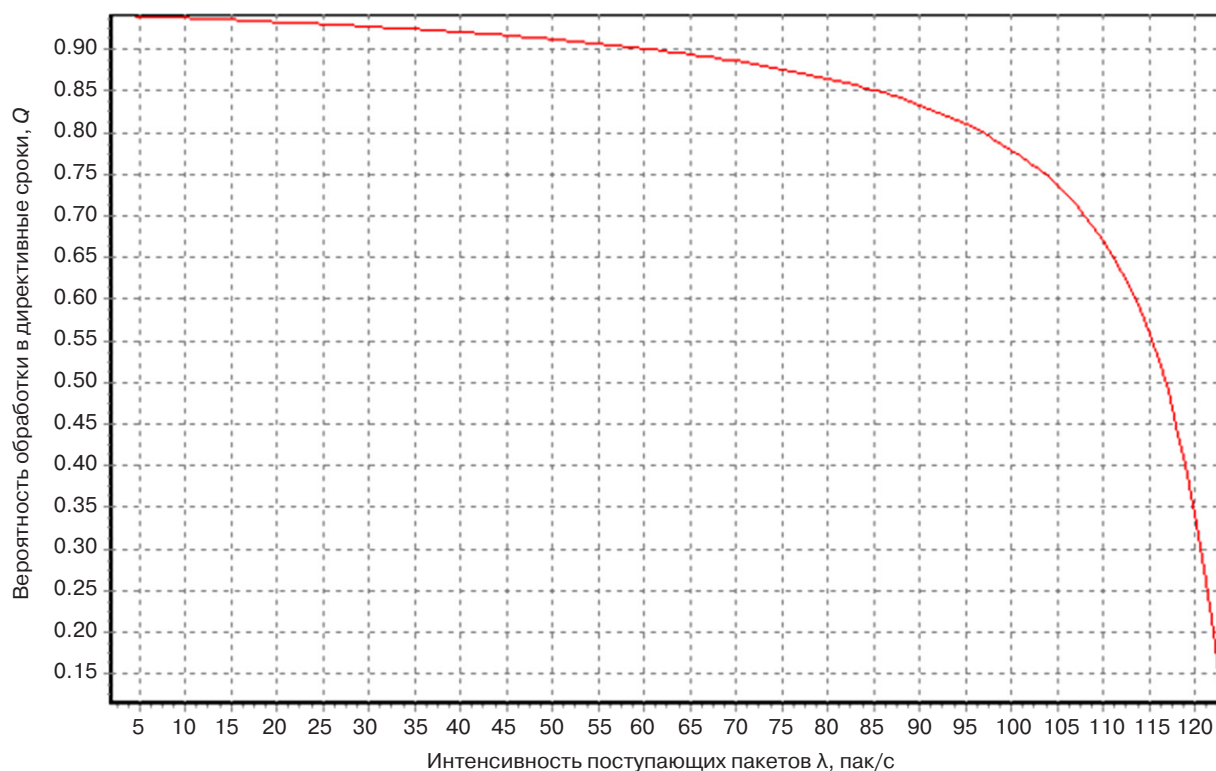


Рис. 9. Зависимость вероятности обработки синхронных пакетов в заданные директивные сроки в FDDI-сети системы ЦПС от интенсивности поступления синхронных пакетов

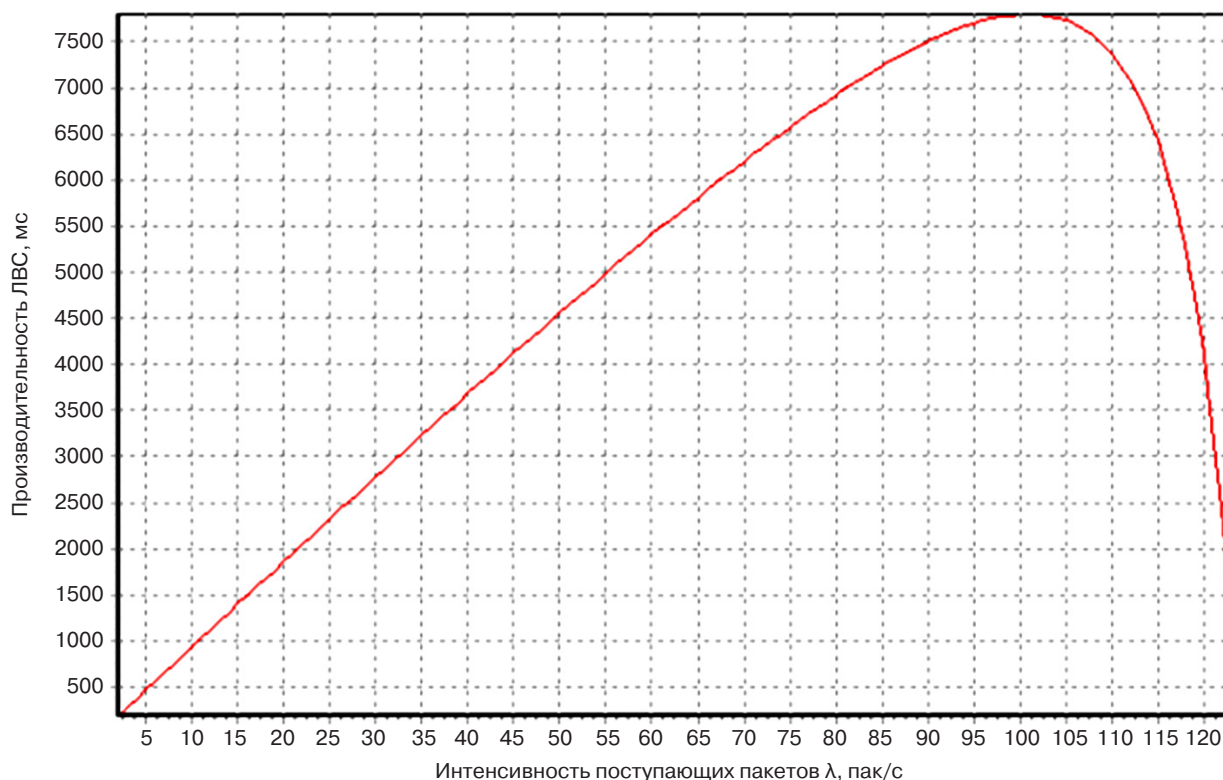


Рис. 10. Зависимость производительности, суммарного своевременно обслуженного потока синхронных пакетов в FDDI-сети системы ЦПС от интенсивности поступления синхронных пакетов

Следовательно, необходимо обеспечивать такие режимы работы FDDI-сети множества разнесенных ЦПС при обмене синхронными пакетами (GOOSE-сообщениями и пакетами, передающими синхронизированные параметры векторных измерений для ЦПС) между различными ЦПС, чтобы не достигать области резкого изменения производительности FDDI-сети, т.е. необходимо контролировать интенсивности входных потоков и ограничивать их рост.

Конкретные рекомендации по выбору параметров и режимов функционирования FDDI-сети, используемой для обмена информацией в распределенной системе ЦПС, можно получить, проводя многовариантные аналитические расчеты с помощью комплекса программ, реализующего разработанный аналитический метод исследования оптоволоконных FDDI-сетей с учетом надежности передающей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана стандартная технологическая схема подготовки отчетов диспетчерами ЦПС. Предложено использовать отказоустойчивую FDDI-сеть с двумя оптоволоконными кольцами как телекоммуникационный компонент для обмена информацией между различными узлами в системе удаленных ЦПС. Дискретные GOOSE-сообщения формируют синхронный поток пакетов FDDI-сети, в то время как

информационные сообщения, возникающие при выполнении основных технологических операций при подготовке отчетов диспетчерами ЦПС, такой поток не формируют.

Исследованы аспекты разработки аналитических моделей для оценки вероятностно-временных характеристик и производительности FDDI-сетей с оптоволоконными кольцами с учетом возможных отказов в передающей среде. Поставлена задача и разработан аналитический метод для оценки производительности FDDI-сетей с учетом надежности передающей среды, что расширяет область применения аналитических подходов.

В результате проведенных исследований сделан вывод о необходимости внедрения механизма управления потоками пакетов, поступающими в сеть, для обеспечения эффективного функционирования сетей FDDI. Таким образом, контроль интенсивности входных потоков и ограничение их роста приобретают важное значение в обеспечении эффективной работы сети.

На основе разработанного аналитического метода создан комплекс программ для изучения процессов передачи информации в FDDI-сетях. Это программное обеспечение позволяет провести многовариантный анализ различных режимов работы FDDI-сетей, используемых для передачи данных между удаленными ЦПС.

В рамках этого исследования получены аналитические выражения для оценки загрузки узлов и передающей среды, среднего времени пребывания пакета в сети, вероятности своевременного обслуживания пакетов и производительности. Учтены особенности функционирования сети FDDI и надежности передающей среды при формулировании этих выражений.

Обнаружено, что существует критическая нагрузка для FDDI-сетей, при которой производительность сети достигает максимума и затем резко снижается. С увеличением интенсивности отказов передающей среды критические режимы работы FDDI-сети смещаются в сторону меньших нагрузок.

Для обеспечения эффективного функционирования FDDI-сетей необходимо регулировать режимы работы так, чтобы избежать достижения критической нагрузки на узлах и в передающей среде. Контроль интенсивности входных потоков и ограничение их роста являются ключевыми элементами для систем ЦПС в FDDI-сетях.

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. Громов И.В., Егоров Е.П., Кошельков И.А. Сравнительный анализ положений различных редакций стандарта IEC 61850 при использовании протоколов GOOSE и SV. *Релейная защита и автоматизация*. 2019;4(37):46–49. URL: <https://elibrary.ru/icfpna>
2. 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>
3. Бессольцев В.С., Хорьков С.А. Цифровая подстанция: Структура, протоколы, архитектура. *Сборник тезисов XII Международной научно-практической конференции*. Ижевск, 15 апреля 2022 г. Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований; 2022. С. 23–27.
4. Zhmatov D.V. Technical Condition Monitoring of Electric Equipment in the Digital Substation. In: *2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. 2020. P. 983–986. <https://doi.org/10.1109/SUMMA50634.2020.9280800>
5. Харламов В.А., Романов С.Е., Хасанов А.Х. Способы передачи GOOSE-сообщений между подстанциями для систем РЗА. *Релейщик*. 2022(2):12–17.
6. Безденежных М.Н., Егоров А.П., Кошельков И.А., Дони Н.А. Анализ сетевой нагрузки GOOSE по МЭК 61850-8-1:2011. *Автоматизация и ИТ в энергетике*. 2019;8(121):22–25. URL: <https://elibrary.ru/ojmxwt>
7. Wei M., Chen Z. Study of LANs access technologies in wind power system. In: *IEEE PES General Meeting*. Minneapolis, MN, USA. 2010.
8. 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>
9. 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>
10. Кульба В.В., Мамиконов А.Г., Шелков А.Б. Резервирование программных модулей и информационных массивов в АСУ. *Автоматика и телемеханика*. 1980;8:133–141.
11. 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>
12. Акимов Г.П., Соловьев А.В., Тарханов И.А. Моделирование надежности распределенных вычислительных систем. *Информационные технологии и вычислительные системы (ИТВС)*. 2019;3:70–86. <https://doi.org/10.14357/20718632190307>
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. 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.
16. 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)

REFERENCES

1. Gromov I.V., Egorov E.P., Koshelkov I.A. Comparative analysis of the provisions of various editions of the IEC 61850 standard when using the GOOSE and SV protocols. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya = Relay Protection and Automation*. 2019;4(37):46–49 (in Russ.).
2. 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>
3. Bessoltsev V.S., Khorkov S.A. Digital substation: Structure, protocols, architecture. *Collection of abstracts of the 12th International Scientific and Practical Conference*. Izhevsk; 2022. P. 23–27 (in Russ.).
4. Zhmatov D.V. Technical Condition Monitoring of Electric Equipment in the Digital Substation. In: *2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. 2020. P. 983–986. <https://doi.org/10.1109/SUMMA50634.2020.9280800>
5. Kharlamov V.A., Romanov S.E., Khasanov A.K. Ways to transmit GOOSE messages between substations for PAC systems. *Releishchik*. 2022(2):12–17 (in Russ.).
6. Bezdenzhnykh M.N., Egorov A.P., Koshelkov I.A., Doni N.A. GOOSE network load analysis software IEC 61850-8-1:2011. *Avtomatizatsiya i IT v Energetike*. 2019;8(121):22–25 (in Russ.). Available from URL: <https://elibrary.ru/ojmxwt>
7. Wei M., Chen Z. Study of LANs access technologies in wind power system. In: *IEEE PES General Meeting*. Minneapolis, MN, USA. 2010.
8. 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>
9. 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>
10. 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.).
11. 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>
12. 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>
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. 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.).
16. 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 programirovaniya 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)

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>