На правах рукописи

Короткова Виктория Игоревна

Разработка метода оценки задержек пакетов информации в очередях коммутаторов мультисервисных сетей доступа

Специальность: 2.2.15 -

Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва - 2026 г.

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

Научный руководитель:	**Пшеничников Анатолий Павлович** - кандидат технических наук, профессор, эксперт Попечительского совета Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ)
Официальные оппоненты:	**Гайдамака Юлия Васильевна** - доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Теория вероятностей и кибербезопасность» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы» (ФГАОУ ВО РУДН) **Горчаков Андрей Петрович** - кандидат физико-математических наук, советник генерального директора ООО «Алмаз-Антей Телекоммуникации»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (**ФГБОУ ВО ПГУТИ**)

Защита состоится «14» января 2027 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 55.2.002.01 при Ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, МТУСИ, аудитория А-211.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте МТУСИ: https://dis.mtuci.ru/upload/srd/Dis-KorotkovaVI/dis-KorotkovaVI.pdf

Автореферат разослан «10» ноября 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 55.2.002.01,
кандидат технических наук, доцент _____ Вероника Михайловна Сахарчук

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Интеграция информационно-коммуникационного оборудования формирует качественно новый уровень технологических решений — инфокоммуникационные технологии, соответствующие инфраструктуры сетей и спектры услуг.

Инфокоммуникационные услуги в пакетных сетях реализуются в мультисервисных узлах доступа, позволяющих объединить различные услуги в одном устройстве и обеспечить передачу данных по единой IP-инфраструктуре.

Важнейшим критерием оценки качества мультимедийных услуг является временная задержка пакетов информации, нормированная МСЭ-Т для голосового трафика в рекомендации G.114. В исходящих мультисервисных узлах доступа помимо нормированных задержек пакетирования возникают дополнительные временные задержки, обусловленные формированием и обслуживанием пакетов информации в приоритетных очередях коммутаторов. Эти задержки могут значительно ухудшить уровень качества, поэтому при проектировании сетей необходимо учитывать эти дополнительные, ненормированные задержки.

Таким образом, тематика диссертационной работы, направленная на оценку ненормированных задержек пакетов информации в приоритетных очередях пакетных коммутаторов, приобретает особую значимость и актуальность при оценке качества обслуживания голосовых сообщений в мультисервисных сетях связи.

Степень разработанности темы исследования. Анализ характеристик качества обслуживания мультимедийного трафика в мультисервисных сетях связи опубликован в работах отечественных авторов Ю. В. Гайдамаки, Б. С. Гольдштейна, В. М. Вишневского, И. А. Кочетковой, А. Е. Кучерявого, В. А. Нетеса, А. И. Парамонова, А. П. Пшеничникова, А. В. Рослякова, К. Е. Самуйлова, О. В. Семёновой, Н. А. Соколова, С. Н. Степанова, М. А. Шнепс-Шнеппе, В. П. Шувалова; зарубежных авторов U. Black, S.C. Borst, J. M. Garcia, D. McDysan, D. Minoli, H. Takagi, F.A. Tobagi и других.

Вместе с тем анализ научной литературы показывает, что ряд вопросов, связанных с оценкой задержек пакетов информации именно в мультисервисных узлах доступа с учётом особенностей формирования мультимедийного трафика, организации логического разделения потоков, особенностей обслуживания приоритетных очередей и применения современных методов управления трафиком, остаётся недостаточно изученным.

Это подчёркивает необходимость дальнейшего совершенствования математических методов исследования подобных систем и разработки прикладных алгоритмов и программ, ориентированных на инженерные расчёты при проектировании сетей доступа.

Объектом исследования являются узлы доступа мультисервисной сети связи.

Предметом исследования является разработка метода оценки ненормированных задержек пакетов информации при циклическом опросе приоритетных очередей в пакетных коммутаторах узлов доступа мультисервисных сетей связи.

Целью диссертационного исследования является разработка метода оценки ненормированных задержек пакетов информации, возникающих при циклическом опросе приоритетных очередей пакетных коммутаторов мультисервисных узлов доступа.

Научная задача исследования заключается в создании теоретического и практического инструментария для оценки ненормированных задержек пакетов информации при циклическом опросе приоритетных очередей в пакетных коммутаторах мультисервисных сетей доступа.

Для достижения этой цели решены следующие частные задачи:

1. Систематизированы требования к сетям доступа в концепциях NGN, FN и Network 2030. Выявлены тенденции увеличения пропускной способности разнородного обслуживаемого трафика и требования к задержке, а также обоснована необходимость оценки задержек пакетов в очередях коммутаторов мультисервисных узлов доступа.

2. Разработаны функциональная и математическая модели узла доступа мультисервисной сети связи, учитывающие пакетизацию мультимедийных сообщений, организацию виртуальных локальных сетей в пакетных коммутаторах, размещение пакетов в очередях коммутаторов и процедуры их обслуживания.

3. Разработаны алгоритмы и программы для ЭВМ, обеспечивающие вычисления ненормированных задержек пакетов информации в приоритетных очередях коммутаторов мультисервисных узлов доступа.

4. Проанализировано влияние параметров трафика и систем поллинга на ненормированные задержки пакетов информации в мультисервисных узлах доступа.

Методология и методы исследования. Методологическую основу диссертационной работы составляют методы теории телетрафика, теории массового обслуживания, а также методы анализа средних длин очередей в системах поллинга, методы аналитического исследования, численного анализа и программной реализации расчётных процедур.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана функциональная модель узла доступа мультисервисной сети связи, которая в отличие от известных моделей позволяет учитывать совместное влияние следующих факторов: пакетизацию мультимедийных сообщений; организацию виртуальных локальных сетей VLAN в пакетных коммутаторах; размещение пакетов информации в приоритетных очередях коммутаторов; процедуры обслуживания пакетов информации. Показано, что суммарные нормированные задержки голосовых пакетов информации «от говорящего до

слушающего» составляют 200 мс, что в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т G.114 соответствует хорошему качеству обслуживания.

2. На основании построенной функциональной модели узла доступа разработана математическая модель и метод оценки ненормированных задержек пакетов информации при циклическом опросе сервером приоритетных очередей пакетных коммутаторов. В отличие от известных методов разработанный подход позволяет находить оценки задержек с приемлемой для инженерных расчётов погрешностью 3–5%.

3. Разработаны алгоритмическое и программное обеспечения для оценки ненормированных задержек пакетов информации при циклическом опросе приоритетных очередей в пакетных коммутаторах мультисервисных узлов доступа. В отличие от известных методов алгоритмы и программа для ЭВМ позволили оценивать качество обслуживания голосового трафика («из конца в конец») «от говорящего до слушающего» с учётом ненормированных задержек пакетов информации.

4. С помощью разработанной программы для ЭВМ в примере системы поллинга из трёх очередей проведено исследование влияния параметров трафика и системы поллинга на средние значения ненормированных задержек пакетов информации. Вычисления на ЭВМ в примере из трёх очередей показали, что задержка голосовых пакетов в очереди составила более 10% от нормируемой задержки в рекомендации МСЭ-Т G.114, что снижает качество телефонной связи из «хорошего» в «приемлемое». Из этого следует необходимость использования разработанной программы при проектировании систем поллинга.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные положения:

1. В результате анализа требований к сетям доступа в концепциях NGN, FN и Network 2030 установлено, что в период 2010-2030 гг. целевые скорости передачи в сетях доступа увеличиваются со 100 Мбит/с до 100 Гбит/с, а требования к суммарной задержке для критичных к задержке сценариев уменьшаются со 100 мс до 5 мс. Это обуславливает необходимость расчёта оценки ненормированных средних значений задержек пакетов информации в очередях коммутаторов мультисервисных узлов доступа как переменной составляющей общей задержки передачи пакетов информации.

2. Функциональная модель узла доступа мультисервисной сети связи, учитывающая пакетизацию мультимедийных сообщений, организацию виртуальных локальных сетей VLAN в пакетных коммутаторах, размещение пакетов в очередях коммутаторов и процедуры их обслуживания, позволяет сформулировать задачу оценки средних задержек пакетов в мультисервисном узле доступа в терминах расчёта соответствующих характеристик систем поллинга.

3. Разработанный приближённый метод анализа средних длин очередей системы поллинга позволил вычислить с помощью ЭВМ ненормированные задержки пакетов информации в приоритетных очередях коммутаторов узлов доступа в примере из трёх очередей: задержки пакетов в очередях, обслуживающих голосовой трафик, трафик ВКС и ПД составили соответственно 24,407 мс, 14,63 мс и 6,69 мс. Показано, что ненормированные средние значения задержек голосовых пакетов информации в исследуемой системе поллинга при суммировании с нормированными задержками существенно снижают качество телефонных сообщений.

4. Разработанные алгоритмическое и программное обеспечения для расчёта ненормированных задержек пакетов информации при циклическом опросе приоритетных очередей в пакетных коммутаторах узлов доступа рекомендовано использовать при мониторинге качества обслуживания пользователей «от говорящего до слушающего» и при проектировании мультисервисных узлов доступа.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии методов анализа мультисервисных сетей доступа и расширении представлений о процессах формирования ненормированных задержек пакетов информации в системах с очередями и их циклическим обслуживанием. Предложенные модели и аналитические соотношения расширяют возможности исследования поведения пакетных коммутаторов при обслуживании разнородного трафика и могут быть использованы при дальнейших исследованиях телекоммуникационных систем, способствуя развитию научного направления.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанный метод и программные средства позволяют оценивать ненормированные задержки пакетов информации на этапе проектирования мультисервисных узлов доступа, выбирать рациональные параметры обслуживания трафика и повышать эффективность функционирования сети. Результаты работы могут быть применены в инженерной практике при оценке качества обслуживания мультимедийных сервисов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается корректностью использованного математического аппарата, реалистичностью полученных в ходе численного анализа результатов, а также их согласованностью с общепринятыми и стандартизированными параметрами задержек. Основные результаты работы обсуждались и докладывались на международных научно-технических конференциях и форумах, в том числе на Юбилейном тридцатом международном научно-техническом форуме «Телекоммуникационные и вычислительные системы» в 2022 г., на Международных отраслевых научно-технических конференциях «Технологии информационного общества» в 2023 г., в 2025 г. и в 2026 г.

Основные результаты диссертации изложены в 11 опубликованных работах, в их числе 2 работы в изданиях, включённых в список ВАК Минобрнауки России, 2 работы в изданиях, входящих в международную базу цитирования WoS и SCOPUS, 7 работ в изданиях, включённых в библиографическую базу научных публикаций РИНЦ, включая свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует научной специальности 2.2.15 — «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» и отвечает пунктам 5 и 6 паспорта специальности, а именно:

пункту 5 - «Исследование путей совершенствования управления информационными потоками»;

пункту 6 - «Развитие и разработка новых методов доступа абонентов к ресурсам сетей, систем и устройств телекоммуникаций».

Личный вклад автора. Основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию включены результаты, полученные лично автором. Диссертантом разработаны алгоритмы и программное обеспечение для оценки задержек пакетов информации в очередях коммутаторов мультисервисных узлов доступа. Программа для ЭВМ разработана при преобладающем участии диссертанта.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка терминов, списка литературы и 2 приложений. Объём диссертации составляет 126 страниц без учёта приложений, содержит 33 рисунка и 15 таблиц. Список литературы включает 116 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, представлены основные научные результаты диссертации, изложена их научная новизна и практическая значимость.

В первом разделе диссертации рассматриваются требования к параметрам сетей доступа при реализации концепций развития мультисервисных сетей связи.

В подразделе 1.1 приведены результаты анализа требований к параметрам сетей доступа в концепции МСЭ-Т «Сети следующего поколения – NGN» (Next Generation Network). Рассмотрены основные характеристики и базовые принципы архитектуры NGN. Архитектура имеет физическое и логическое разделение следующих трёх уровней: транспортного, на базе технологии IP/MPLS (Multiprotocol Label Switching – мультипротокольная коммутация по меткам), работающего поверх IP; управления вызовами (сеансами) на базе подсистемы

обслуживания мультимедийных сообщений IMS (IP Multimedia Subsystem); управления услугами.

Для управления сеансами связи подсистема IMS использует протокол сигнализации SIP (Session Initiation Protocol) и базу (сервер) абонентских данных HSS (Home Subscriber Server). Приведён анализ основных функций IMS. Для преобразования всех поступающих сообщений в пакетный вид в узле доступа устанавливаются медиашлюзы.

Управление шлюзами реализуется с помощью протокола H.248/MEGACO.

Шлюзы и пакетные коммутаторы Ethernet реализуются в виде мультисервисного узла доступа MSAN (Рисунок 1).

Коммутация пакетов осуществляется на базе стека протоколов TCP/IP с использованием технологии IP/MPLS. В диссертации анализируются услуги NGN и требования к сетевым показателям качества обслуживания QoS (Quality of Service) в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т Y.1541. Одним из основных показателей качества обслуживания в сетях с коммутацией пакетов является задержка передачи пакетов информации.

В подразделе 1.2 приведён анализ требований к параметрам сетей доступа в концепции МСЭ-Т «Будущие сети – FN» (Future Networks).

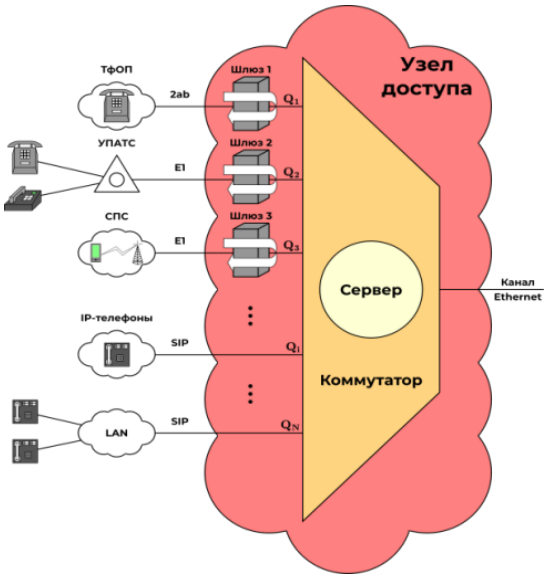


Рисунок 1 — Мультисервисный узел доступа (MSAN). Через Q_i обозначена i-я очередь

В рекомендации МСЭ-Т Y.3011 одним из главных принципов реализации Будущих сетей является виртуализация сетевых ресурсов. Физические ресурсы — транспортные, вычислительные и ресурсы хранения представляются в виде виртуальных ресурсов, которые объединяются для создания виртуальных сетей.

При взаимодействии 3GPP и ETSI в рамках проекта TISPAN разработана виртуальная платформа vIMS (virtual IMS). В диссертационной работе приведены рекомендации по применению vIMS для управления функционированием различных сетей связи.

Диапазоны параметров услуг Будущих сетей по скорости и длительности нормированы в рекомендации МСЭ-Т Y. 3042 и приведены на рисунке 2.

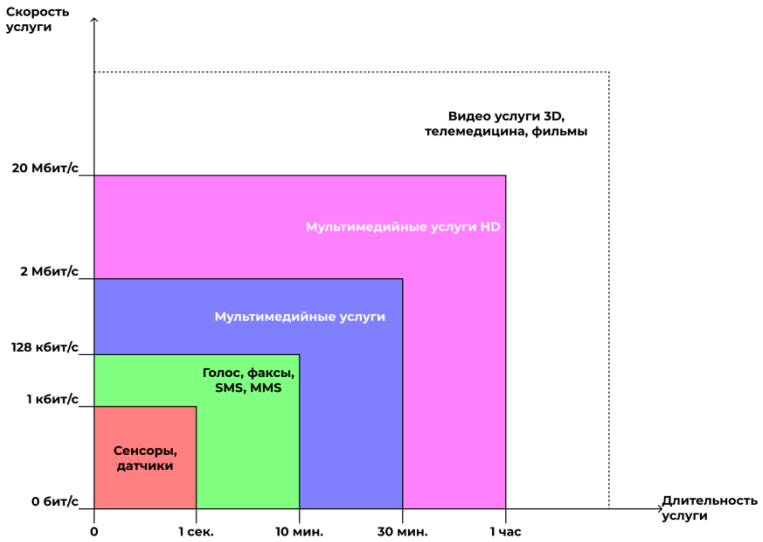


Рисунок 2 — Диапазоны параметров услуг Будущих сетей по скорости и длительности

В результате реализации концепции Будущих сетей ETSI прогнозирует реализацию следующих трёх сценариев:

1. Всестороннее применение оптоволоконных соединений – «Оптоволокно до всего и повсюду»;

2. Улучшенная фиксированная широкополосная связь – увеличение скорости в сети доступа до 10 Гбит/с с использованием технологии Ethernet;

3. Гарантированная надёжность доставки – задержка в сети доступа – менее 30 мс.

В подразделе 1.3 приведены результаты анализа требований к параметрам сетей доступа в концепции МСЭ-Т «СЕТИ 2030 – Network 2030».

В сетях Network 2030 необходимо обеспечить: взаимодействие между услугами и сетью; передачу голографических и мультисенсорных сообщений; передачу информации в строго определённое время; наличие мощных вычислительных и коммуникативных ресурсов в мультимедийных платформах доступа; бесшовное соединение разнородных сетевых инфраструктур; повышенные требования к качеству обслуживания QoS.

Основными компонентами сети доступа в Network 2030 являются: сети радиодоступа и фиксированного доступа; базовые станции сотовых сетей связи; граничные вычисления для принятия решений в реальном времени; различные контроллеры, например качества услуг, сетевых срезов и др.

В соответствии с исследованиями МСЭ-Т FG Network 2030 ожидается, что за период с 2010 г. по 2030 г. скорость передачи пакетов в сетях доступа/граничных сетях увеличится со 100 Мбит/с до 100 Гбит/с, а задержки передачи пакетов снизятся со 100 мс до 5 мс (Рисунок 3) для третьего, четвёртого и пятого поколений фиксированных сетей связи (F3G, F4G и F5G соответственно).

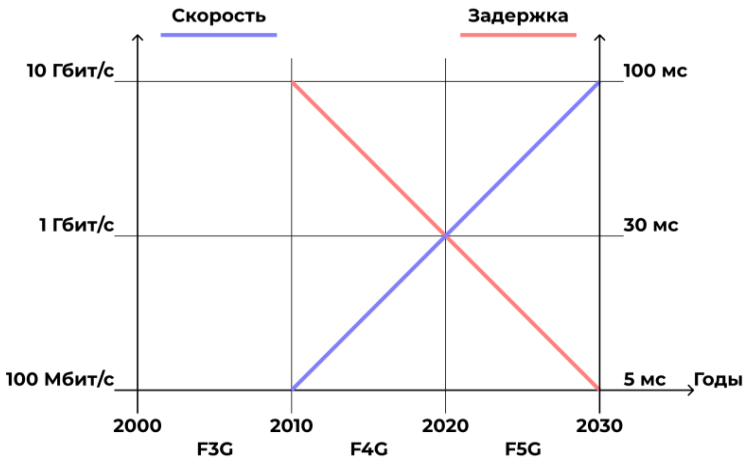
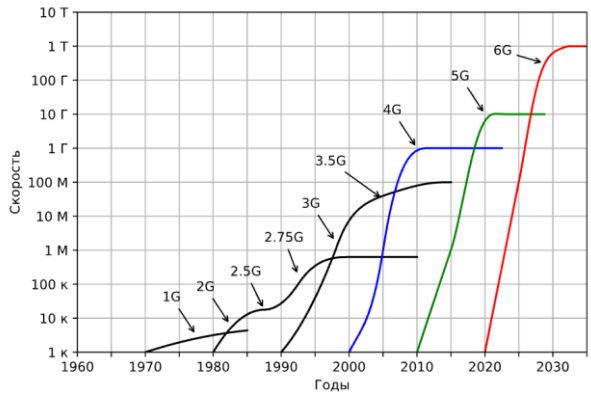
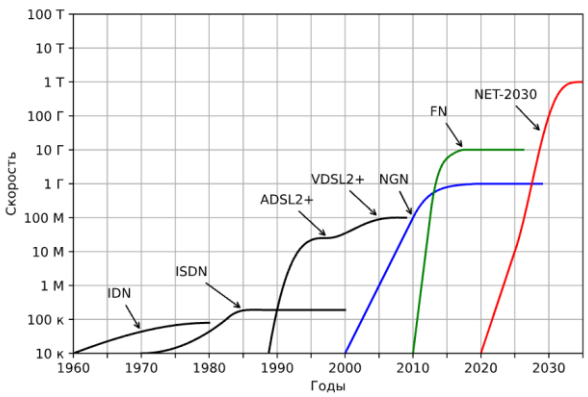


Рисунок 3 — Эволюция основных параметров сетей доступа/граничных сетей (F3G, F4G, F5G – поколения сетей фиксированной связи)

В IMS с помощью протокола SIP поддерживается персональная мобильность пользователей. Начиная с 2000 г., МСЭ-Т согласует по времени смену концепций развития фиксированных сетей связи со сменой поколений сетей сотовой подвижной связи («правило 10 лет»). Пиковые скорости в фиксированных сетях связи в соответствии с концепциями NGN, FN, Network 2030 согласованы с пиковыми скоростями услуг в сетях сотовой подвижной связи поколений 4G – 6G (Рисунок 4- (а) и (б)).



а)



б)

Рисунок 4 — Эволюция пиковых скоростей в сетях сотовой подвижной связи (а) и в фиксированных сетях связи (б)

Обобщённые требования к параметрам узлов доступа MSAN приведены в таблице 1. Высокая задержка голосовых пакетов при телефонной связи может привести к: накладывающимся друг на друга шумам, когда один участник перебивает другого; эху. При задержке более 35÷40 мс, этот эффект становится заметным и раздражающим; нарушению непрерывности принимаемого образца речи, например, из-за кратковременного увеличения (скачка) задержки. Это воспринимается на слух как «заикание»; нарушение синхронизации между голосом и другими типами данных, например, во время видеоконференций.

Во втором разделе разработана функциональная модель узла доступа мультисервисной сети связи. **В подразделе 2.1** описан необходимый функционал мультисервисного узла доступа. Он включает в себя пакетизацию сообщений, постановку в очередь, организацию и управление VLAN, а также циклический опрос очередей.

Таблица 1 — Требования к параметрам узлов доступа MSAN

Концепции	**Оборудование узлов доступа**	**Транспортные технологии**	**Пиковые скорости, Гбит/с**	**Допустимые задержки, мс**
NGN	Шлюзы доступа. Среда передачи – медный кабель, оптоволокно, радиолиния. Протоколы управления: SIP, MGCP, H.248/MEGACO, SIGTRAN, RADIUS и др.	NGSDH, WDM, DWDM, Ethernet поверх NGSDH, IP/MPLS.	0,1	до 100
FN	Виртуализация сетевых ресурсов, абстрагирование интерфейсов, технология Carrier Ethernet.	Carrier Ethernet, интерфейсы: «пользователь-сеть», «межсетевой интерфейс».	10	до 30
Network 2030	Коммуникации: – голографические; – высококачественные; – высокоточные.	«Оптоволокно до всего и повсюду». Новые интерфейсы: «сеть-сеть»: «Оператор-Оператор».	100	до 5

Параметры функциональной модели детально рассмотрены в разделе 3.

При подготовке пакетов голосовых сообщений в системах передачи возникают задержки. Эти задержки нормированы МСЭ-Т и в приказе Минцифры России от 25.11.2021 № 1229. При циклическом опросе приоритетных очередей в системе поллинга длительность ожидания пакетов в очереди $t_{опр.оч.}$ зависит от параметров трафика и системы поллинга, поэтому эта длительность не нормируется, а рассчитывается. Далее она названа ненормируемой задержкой.

Нормированные задержки во время передачи составляют порядка 200 мс. При суммировании с ненормированными задержками качество связи снижается второго уровня «хорошее» в третий уровень — «приемлемое» (таблица 2).

Таблица 2 — Уровни качества телефонной связи по рекомендации МСЭ-Т G.114

Уровни качества телефонной связи	**Величина задержки**	**Качество связи**
Первый	до 150 мс	Отличное
Второй	от 150 мс до 200 мс	Хорошее
Третий	от 200 мс до 400 мс	Приемлемое
Четвёртый	от 400 мс до 450 мс	Плохое

В подразделе 2.2 рассмотрена реализация функций кодирования информации реального времени (голосовые и мультимедийные сообщения) в шлюзах узла доступа.

При кодировании речи используются кодеки: G.711, G.729, G.728, iLBC и Opus для VoIP (Voice over IP) и видеоконференций. AAC (Advanced Audio Coding) — формат сжатия аудио, используется для хранения и передачи музыки и звука.

Кодирование видеоинформации реализуется с помощью видеокодеков H.264/AVC MPEG-4 Part 10 или AVC (Advanced Video Coding), H.265 или HEVC (High Efficiency Video Coding). Последний рекомендуется для 4K- и 8K-видео, позволяет уменьшать размер файлов почти вдвое по сравнению с H.264 при сохранении детализации.

Кодеки для сжатия данных: JPEG, PNG, GIF (изображения), MP3, AAC, Vorbis, Opus (аудио) и H.264/AVC, H.265/HEVC, VP8, VP9 (видео).

В подразделе 2.3 проведён анализ размещения пакетов в очередях.

Планировщики строгого приоритета очередей (Strict Priority queuing, SP) и взвешенный циклический перебор (Weighted Round Robin, WRR) могут приводить к перегрузке очередей. В силу этого применяется гибридный планировщик LLQ (Low Latency Queuing), а также метод предотвращения перегрузки WRED (Weighted Random Early Detection).

Установка режима с доверием позволяет создавать барьер для гарантированной работы программы. Классификация в режиме с доверием осуществляется для кадров по классу обслуживания CoS и для пакетов по DSCP (Differentiated Services Code Point).

В подразделе 2.4 рассмотрены принципы организации виртуальных локальных сетей VLAN в пакетных коммутаторах с помощью стандарта ETSI IEEE 802.1Q. В заголовке кадра Ethernet вставляется метка длиной в 4 байта. Формат этой метки приведён в таблице 3.

Таблица 3 — Формат метки по стандарту IEEE 802.1Q

Идентификатор протокола меток 0x8100, бит	**Управляющая информация метки**		
	Приоритет, бит	**Индикатор допустимости удаления, бит**	**Идентификатор VLAN, бит**
16	3	1	12

Управляющая информация метки состоит из трёх частей: код приоритета 3 бита, которые определяют $2^3 = 8$ уровней приоритета (Таблица 4). При этом кадры более высокого приоритета имеют минимальную задержку в обслуживании. Идентификатор VLAN в 12 бит указывает, какой VLAN принадлежит кадр. Идентификатор VLAN может принимать $2^{12} = 4\ 096$ значений. Однако в 2005 году было принято дополнение 802.1ad к стандарту IEEE 802.1Q, реализующее технологию Q-in-Q и позволяющее увеличить общее число VLAN до 16 777 216.

Таблица 4 — Классы и коды приоритетов по обслуживанию QoS, рекомендованные ETSI

Приоритеты		**Тип приоритета**	**Назначение приоритета**
Класс	**Код**		
0	000	Routine	Самый низкий приоритет
1	001	Best Effort Service	Негарантированная доставка
2	010	Immediate	Данные с высоким приоритетом (немедленный)
3	011	Flash	Важные приложения
4	100	Flash Override	Передача видео (переопределение вспышки)
5	101	Enterprise Cache Protocol	Передача голоса (протокол кэширования)
6	110	Routing	Межсетевой контроль (маршрутизация)
7	111	Network Management Traffic	Трафик управления сетью. Самый высокий приоритет.

В третьем разделе разработан метод оценки ненормированных задержек при циклическом опросе очередей в коммутаторе мультисервисного узла доступа.

В подразделе 3.1 приведена структура и компоненты системы стохастического поллинга.

Система стохастического поллинга — это система массового обслуживания с несколькими очередями и одним общим обслуживающим прибором (сервером). Пакеты после маркировки размещаются в очередях $Q_1, Q_2 \cdots, Q_N$ в порядке убывания приоритета (где Q_i, $i = \overline{1, N}$ — i -ая очередь, N — число очередей). Порядок опроса очередей сервером — циклический, при котором сервер выбирает очередь для обслуживания.

Цикл — это последовательность опроса сервером всех очередей от Q_1 до Q_N, $N \geq 2$. Время, которое сервер затрачивает на подключение к очереди, называется временем переключения. Начало опроса очереди — момент, когда сервер завершил переключение и готов начать обслуживание очереди. Посещение сервером очереди — это период времени, включающий опрос очереди сервером и последующее её обслуживание, если в очереди есть пакеты.

Дисциплина обслуживания очереди — это принцип, по которому сервер выбирает пакет из очереди для обслуживания. Для предотвращения монопольного захвата всего ресурса сервера при обслуживании одной очереди принята *шлюзовая дисциплина обслуживания*, при которой сервер обслуживает лишь те заявки, которые находились в очереди в момент начала её опроса. Заявки, поступившие в очередь при опросе и после опроса, обслуживаются в следующем цикле.

На рисунке 5 приведена простейшая модель системы стохастического поллинга.

Обозначения в модели системы стохастического поллинга:

λ_i — параметр потока пакетов информации, поступающих в i -ую очередь;

t_i — средняя длительность обслуживания одного пакета i -ой очереди;

$\rho_i = \lambda_i t_i$ — средняя интенсивность нагрузки в i -ой очереди;

$\rho = \sum_{i=1}^{N} \rho_i$ — суммарная интенсивность нагрузки;

s_i — среднее время переключения между i-ой и $i+1$-ой очередями;

$S = \sum_{i=1}^{N} s_i$ — суммарное время переключения.

При отсутствии пакетов во всех очередях сервер переходит в режим ожидания, время которого определяется параметром β.

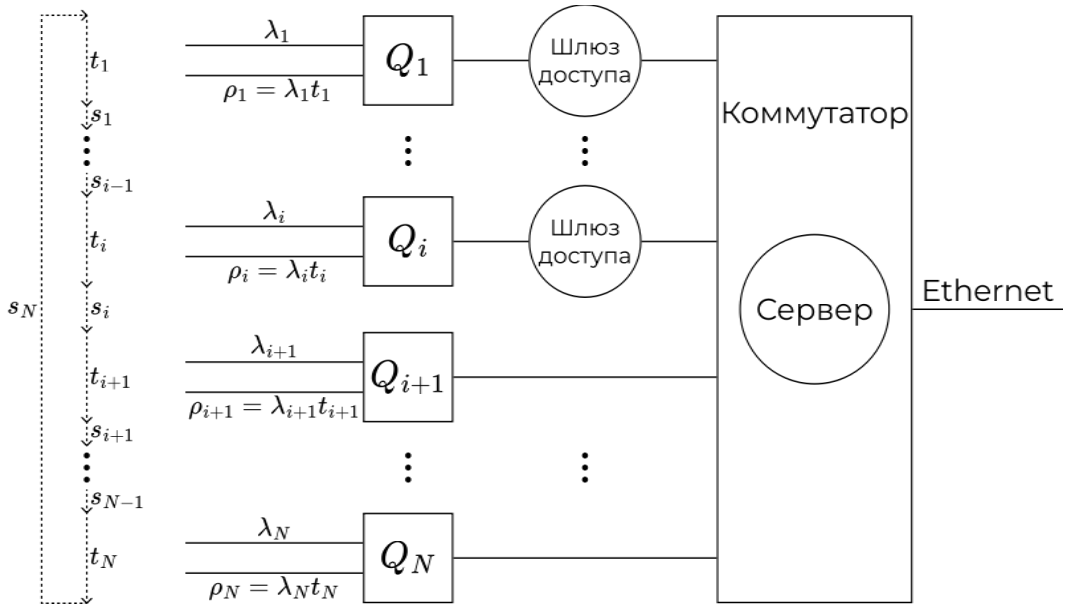


Рисунок 5 — Простейшая модель системы стохастического поллинга

Среднее время цикла C складывается из времени обслуживания всех очередей (доля времени ρ от C) и времени переключения между очередями S за цикл, то есть $C = \rho C + S$, откуда среднее время цикла $C = S/(1-\rho)$.

В подразделе 3.2 приведён краткий анализ работ по стохастическому поллингу.

Большинство работ по методам анализа различных систем поллинга сводятся к методу производящих функций, позволяющему во многих случаях находить точное решение, и к приближённому методу средних длин очередей, наиболее удобному для алгоритмизации и получения количественных оценок. Далее используется последний метод, погрешность которого относительно метода производящих функций составляет 3÷5 %.

В подразделе 3.3 приведена итерационная схема расчёта стационарных вероятностей u_i опроса очередей Q_i, $i = \overline{1, N}$, и среднего времени цикла C.

Достаточным условием существования стационарного режима для системы стохастического поллинга является выполнение неравенства (1):

$$\rho < 1 \quad , \quad \rho = \sum_{i=1}^{N} \rho_i \, . \tag{1}$$

Пусть также u_i есть стационарная вероятность того, что очередь Q_i будет опрошена в произвольном цикле, $i=\overline{1,N}$.

Значения среднего времени цикла C и стационарных вероятностей u_i опроса очередей Q_i, $i=\overline{1,N}$, удовлетворяют системе нелинейных уравнений (2) - (3):

$$u_i^{(n+1)}=\frac{1}{1+e^{-\lambda_i C^{(n)}}},\quad i=\overline{1,N}, \tag{2}$$

$$C^{(n+1)}=\frac{1}{1-\rho}\left[\sum_{i=1}^{N}s_i u_i^{(n+1)}+\beta\prod_{i=1}^{N}\left(1-u_i^{(n+1)}\right)\right],\quad n>0. \tag{3}$$

Система уравнений (2) - (3) решается с применением метода простых итераций. Условие сходимости достигается при выполнении (1).

На рисунке 6 представлена блок-схема алгоритма расчёта среднего времени цикла C и стационарных вероятностей u_i. В качестве начального приближения $C^{(0)}$ берётся эмпирическая оценка $C^{(0)}=S/(1-\rho)$. Выходом из метода простых итераций является условие, что относительная погрешность не больше ε, где ε выбирается из условия:

$$\varepsilon=\left|C^{(n+1)}-C^{(n)}\right|/C^{(n)},\ \text{где } n \text{ - номер итерации.}$$

В подразделе 3.4 приведён метод расчёта среднего числа пакетов в очереди Q_i, $i=\overline{1,N}$.

Вероятность того, что все очереди в цикле будут пусты и сервер остановится на случайное время:

$$u=\prod_{i=1}^{N}\left(1-u_i\right).$$

Время пребывания сервера у очереди Q_i, $i=\overline{1,N}$, определяется как:

$$T_i=\rho_i C+s_i\left(u_i+u\right)+\frac{u\beta}{N},\quad i=\overline{1,N} \tag{4}$$

Под (i,j)-ым периодом понимается сумма j последовательных периодов посещения сервером очередей, начиная с Q_i. Средняя продолжительность (i,j)-го периода определяется по выражению:

$$T_{i,j}=\sum_{n=i}^{i+j-1}T_n,\quad i,j=\overline{1,N}. \tag{5}$$

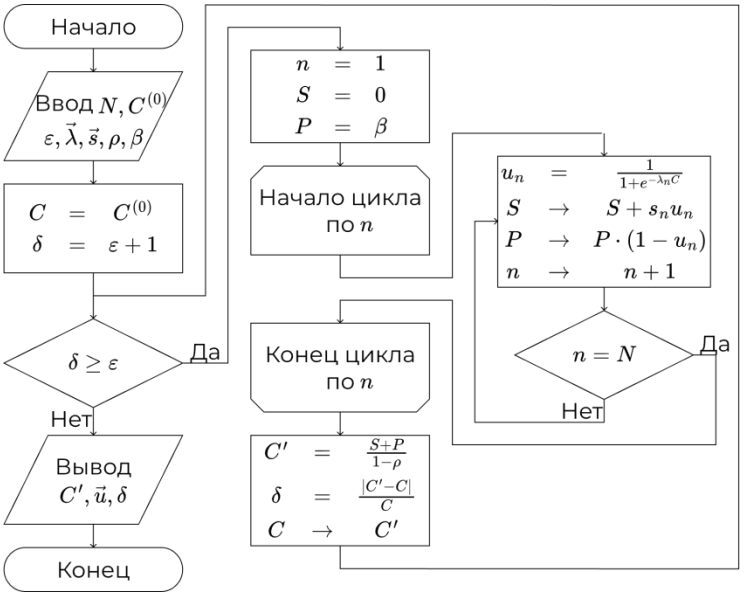


Рисунок 6 — Блок-схема алгоритма метода простых итераций вычислений u_i и C с относительной погрешностью ε

Доля времени, которое сервер проводит в периоде (i, j), есть отношение средней длительности периода (i, j) в цикле к средней продолжительности цикла:

$$q_{i,j} = \frac{T_{i,j}}{C}, \quad i, j = \overline{1, N}. \tag{6}$$

Пусть L_i есть среднее число пакетов в очереди Q_i, когда сервер занят обслуживанием очереди Q_i, $i = \overline{1, N}$. Среднее число пакетов в очереди Q_i может быть выражено через условные величины $L_{i,j}$. При шлюзовой дисциплине обслуживания итоговое значение L_i определяется по (7):

$$L_i = \sum_{n=1}^{N} q_{n,1} \tilde{L}_{i,n} + q_{i,1} \frac{\rho_i}{u_i} \bar{L}_i, \quad i, j = \overline{1, N}, \tag{7}$$

где

$\bar{L}_i$ — среднее число пакетов, обслуживаемых сервером за время посещения очереди Q_i;

$\tilde{L}_{i,j}$ — среднее число пакетов, поступивших в очередь при опросе и после опроса очереди.

Длина очереди $\tilde{L}_{i,j}$ в период (i, j) — это число пакетов, которое поступит в очередь в течение рассматриваемого периода.

$$\sum_{n=i}^{i+j-1}\frac{q_{n,1}}{q_{i,j}}\tilde{L}_{i,n}=\lambda_i\left(T_{i,j}+\frac{1-u-u_i}{1-\rho+\rho_i}\sum_{\substack{m=1\\m\neq i}}^{N}s_m u_m\right),\quad i,j=\overline{1,N}. \tag{8}$$

В системе уравнений (8) значения параметров T_i , $T_{i,j}$ и $q_{i,j}$ рассчитываются по выражениям (4) - (6) соответственно. Блок-схема алгоритма расчёта $\tilde{L}_{i,j}$ по формуле (8) приведена на рисунке 7. Расчёт идёт по двум циклам — внешнему по $i=\overline{1,N}$, и внутреннему по j от 1 до момента, когда $i+j-1=N$ для всех i .

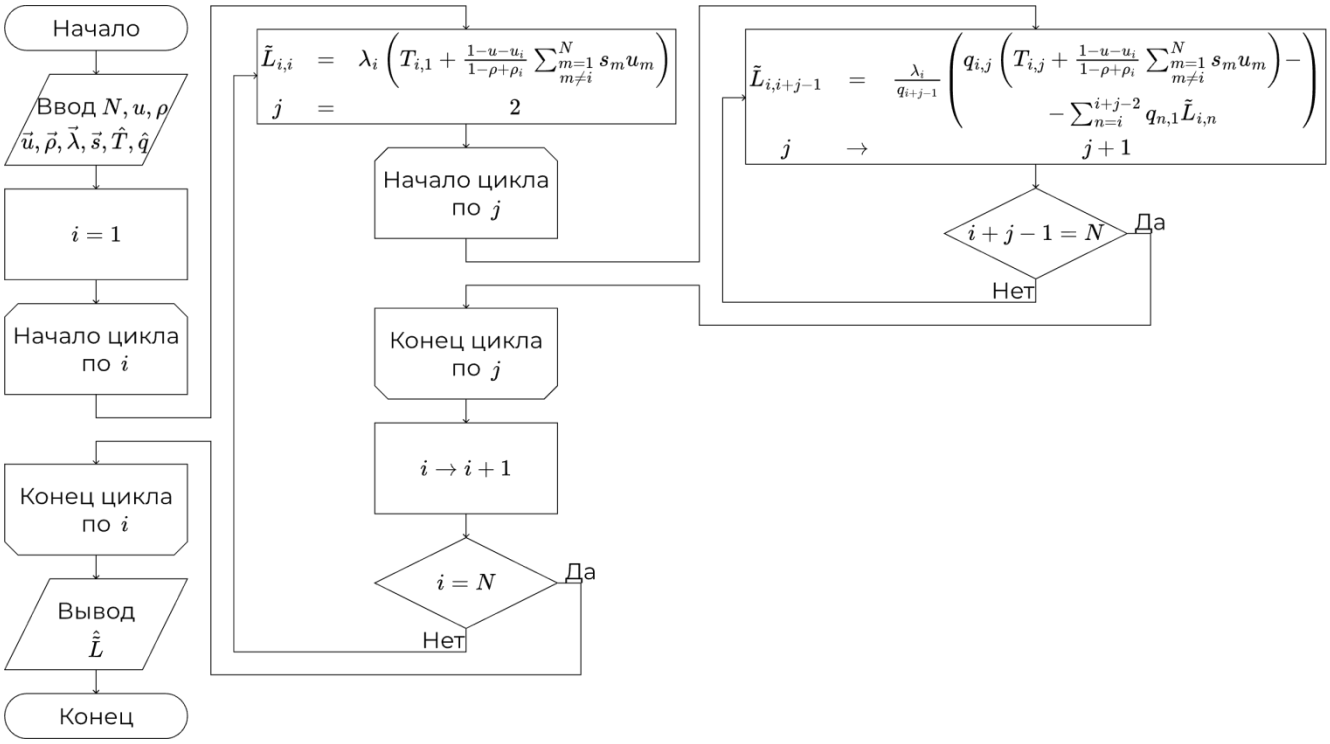


Рисунок 7 — Блок-схема алгоритма расчёта $\tilde{L}_{i,j}$ по формуле (8)

Среднее число пакетов $\overline{L_i}$, которое будет обслужено сервером за время посещения очереди Q_i , вычисляется по выражению (9):

$$\overline{L_i}=\lambda_i\left(T_i+\frac{1-u-u_i}{1-\rho+\rho_i}\sum_{\substack{m=1\\m\neq i}}^{N}s_m u_m\right)-(1-\rho_i)\frac{u_i}{\rho_i}\sum_{n=1}^{N}q_{n,1}\tilde{L}_{i,n},\quad i=\overline{1,N}. \tag{9}$$

На рисунке 8 приведена диаграмма поступления и обслуживания пакетов при шлюзовой дисциплине обслуживания в системе стохастического поллинга из трёх очередей.

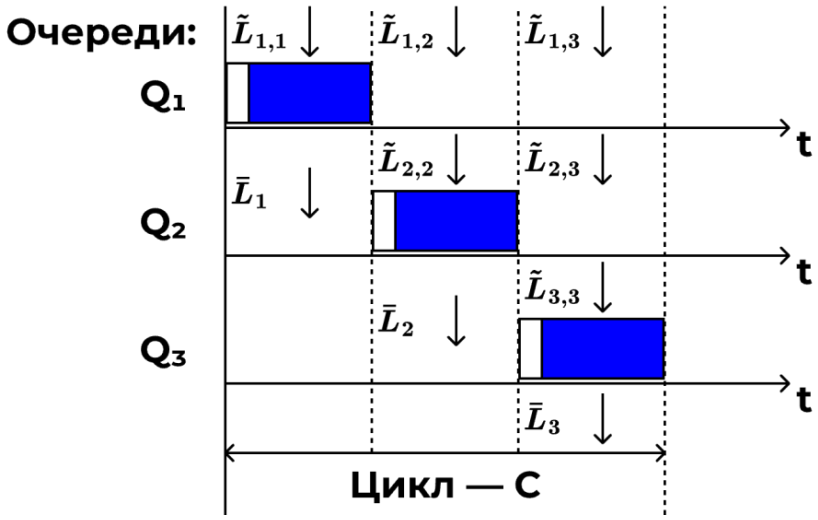


Рисунок 8 — Диаграмма поступления $\tilde{L}_{i,j}$ и обслуживания пакетов $\bar{L}_i$ в системе стохастического поллинга из трёх очередей

После вычисления значений $\tilde{L}_{i,j}$ и $\bar{L}_i$ по выражениям (8) - (9) среднее число пакетов L_i в очереди Q_i вычисляется по выражению (7).

В подразделе 3.5 приведена оценка ненормированных задержек пакетов в очередях по формуле Дж. Литтла: «Долгосрочное среднее количество L_i требований в стационарной системе равно долгосрочной средней интенсивности λ_i входного потока, умноженной на среднее время W_i пребывания пакетов в системе $L_i = \lambda_i W_i$ ». В рассматриваемом случае:

$$W_i = \frac{L_i}{\lambda_i}, \quad i = \overline{1, N}. \tag{10}$$

В подразделе 3.6 приведён пошаговый алгоритм вычисления среднего числа пакетов L_i в очередях Q_i, $i = \overline{1, N}$ с использованием выражений (3.3) - (3.5) и (3.7) - (3.9).

Для вычислений по приведённому выше методу поллинга разработана программа для ЭВМ на языке программирования Python под управлением операционной системы GNU/Linux объёмом 78 229 Кбайт.

В четвёртом разделе проведён анализ влияния параметров трафика и мультисервисного узла доступа на ненормированные задержки пакетов информации в очередях коммутаторов в системе поллинга из трёх очередей.

В подразделе 4.1 представлены результаты вычисления на ЭВМ ненормированных задержек. В таблице 5 показан пример расчёта среднего времени цикла $C^{(n)}$ и стационарных вероятностей $u_i^{(n)}$. Простой итерационный процесс обеспечивает высокую точность

сходимости. В приведённом примере при пяти итерациях отличие на соседних шагах значений составляет 14×10^{-12} с=0.014 нс.

Таблица 5 — Результаты расчётов среднего времени цикла и стационарных вероятностей в системе поллинга из трёх очередей

n	$C^{(n)}$, мкс	$\left\|C^{(n+1)}-C^{(n)}\right\|$, нс	$u_1^{(n)}$	$u_2^{(n)}$	$u_3^{(n)}$
0	9,050843	-	0,5	0,5	0,5
1	8,634789	416,054	1,0	0,86209	1,0
2	8,603638	31,151	1,0	0,851770	1,0
3	8,601230	2,408	1,0	0,850971	1,0
4	8,601043	0,187	1,0	0,850909	1,0
5	8,601029	0,014	1,0	0,850904	1,0

Итоговые ненормированные задержки для голосового трафика, трафика ВКС и ПД составили 24,407 мс, 14,63 мс и 6,69 мс соответственно.

В подразделе 4.2 приведён анализ результатов вычисления на ЭВМ задержек пакетов информации при изменении параметров системы поллинга из трёх очередей.

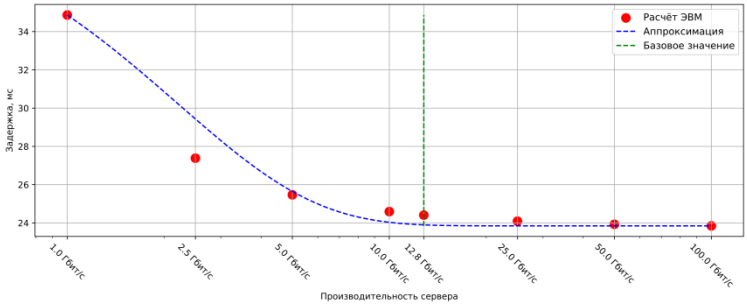
На рисунке 9 красными точками показаны полученные в результате анализа зависимости задержек W_i от производительности сервера. Аппроксимирующие зависимости имеют вид (16):

$$W_i\left(V_{\text{сервер}}\right)\approx a_i e^{-b_i V_{\text{сервер}}}+c_i,\quad i=\{\text{голос},\text{вкс},\text{пд}\},\tag{16}$$

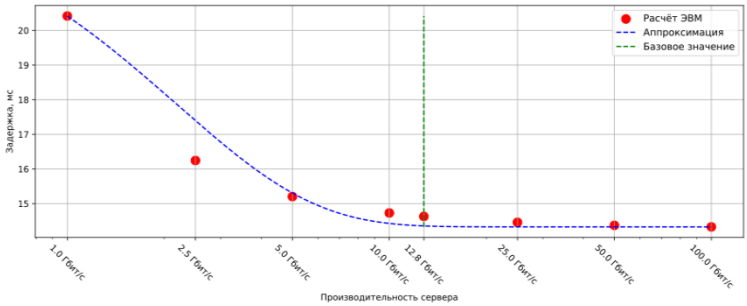
где значения постоянных a_i, b_i, c_i определялись методом наименьших квадратов.

Из (16) и рисунка 9 следует, что ненормированные задержки пакетов информации в очередях пакетного коммутатора существенным образом зависят от производительности сервера. Кроме того, был проведён анализ влияния других параметров системы поллинга на ненормированные задержки. В частности, рост числа пользователей голосового трафика и скорости скачивания данных линейно увеличивают ненормированные задержки.

а)



б)



в)

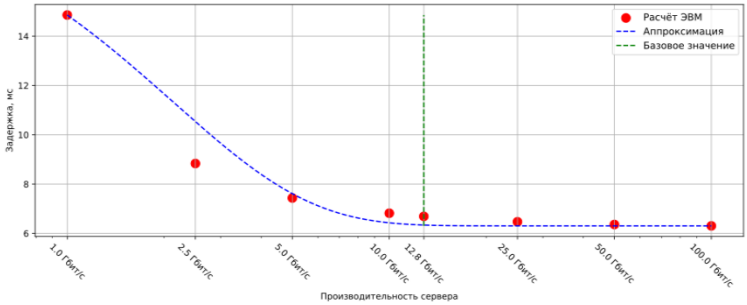


Рисунок 9 — Зависимость W_i от $V_{\text{сервер}}$ для голосового трафика (а), ВКС (б) и ПД (в)

В заключении диссертационной работы представлены основные результаты и выводы по полученным результатам:

1. Проведён анализ требований к параметрам сетей доступа в концепциях NGN, FN и Network 2030. Установлено, что мультисервисные узлы доступа MSAN обеспечивают пакетизацию сообщений, классификацию трафика, агрегацию и передачу потоков речи, видео и данных. При совместном обслуживании этих потоков на выходных интерфейсах коммутаторов формируются очереди, создающие переменную составляющую общей задержки передачи пакетов. Показатели рекомендации МСЭ-Т Y.1541 характеризуют качество передачи IP-пакетов по сетевому тракту, а задержки ожидания в очередях коммутаторов являются одной из составляющих показателя задержки передачи и требуют отдельной оценки.

2. Разработана функциональная модель мультисервисного узла доступа, учитывающая особенности кодирования информации, постановки в очередь, а также организацию виртуальных локальных сетей VLAN и механизмы приоритизации трафика. Анализ функций кодирования информации в шлюзах узла доступа позволил рекомендовать типы кодеков для сжатия изображений, аудио, видео. Показано, что стандарт ETSI IEEE 802.1Q обеспечивает

формирование 4 096 VLAN, а расширение IEEE 802.1ad позволяет увеличить это число VLAN до 16 777 216. Классификация трафика в режиме с доверием для кадров по CoS и для пакетов по DSCP позволяет качественно обрабатывать трафик.

3. Описана модель системы стохастического поллинга. Обосновано применение шлюзовой дисциплины обслуживания в системе поллинга. На основе анализа литературы по стохастическому поллингу установлено, что среднее время цикла и стационарные вероятности опроса очередей связаны системой нелинейных уравнений, решаемой методом простых итераций. Разработан алгоритм вычисления среднего числа пакетов, поступивших в очередь при опросе и после её опроса, а также среднего числа пакетов, обслуженных сервером за время посещения очереди. Среднее время пребывания пакетов в очереди определялось по формуле Дж. Литтла. Для реализации расчётов разработано программное обеспечение для ЭВМ на языке Python, операционная система GNU/Linux, объём программы составил 78 229 Кбайт.

4. Приведены результаты исследований с помощью разработанной программы для ЭВМ ненормированных задержек от параметров трафика и системы поллинга. Проведены исследования влияния различных параметров трафика и системы поллинга на ненормированные задержки. Показано, что при прочих равных условиях увеличение производительности сервера экспоненциально уменьшает ненормированные задержки. Для примера из трёх очередей увеличение числа пользователей голосового трафика и скорости скачивания данных линейно увеличивают ненормированные задержки.

Таким образом, в результате проведенных в диссертационной работе исследований решена научная задача, имеющая значение для проектирования сетей связи, - построена и проанализирована модель мультисервисного узла доступа, которая даёт возможность решить задачу оценки ненормированных задержек пакетов информации при циклическом опросе приоритетных очередей в пакетных коммутаторах мультисервисных сетей доступа. Тем самым цель диссертационного исследования достигнута.

В приложениях к диссертации представлены следующие материалы:

Приложение А. Акты о практической реализации результатов диссертационной работы.

Приложение Б. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

1. Короткова В. И. Перспективные инфокоммуникационные технологии и сетевые услуги / А. П. Пшеничников, В. И. Короткова, Л. С. Поскотин // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. — 2023. — Т. 15, № 3. — С. 57–64. — DOI: 10.36724/2409-5419-2023-15-3-57-64.

2. Короткова В. И. Оценка задержек при циклическом опросе очередей в мультисервисных узлах доступа / В. И. Короткова, А. П. Пшеничников // Электросвязь. — 2025. — № 1. — С. 29–35. — DOI: 10.34832/ELSV.2025.63.1.005.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus

3. Korotkova V. I. Construction and Analysis of a Model of Group Receipt of IoT Elastic Data in a Wireless Access Node / S. N. Stepanov, V. I. Korotkova, M. G. Kanishcheva, A. P. Pshenichnikov // 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of On-Board Communications (SOSG). — Moscow, 2023. — P. 461-467. — DOI: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10091982.

4. Korotkova V. I. The Mathematical Model of a Multiservice Access Node in the Private LTE Network / M. S. Stepanov, T. Dawood, V. I. Korotkova, A. P. Smirnov, L. S. Poskotin // 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of On-Board Communications (SOSG). — Moscow, 2024. — P. 443-451. — DOI: 10.1109/IEEECONF61479.2024.10496731.

Прочие публикации

5. Короткова В. И. Виртуальная мультимедийная подсистема vIMS / А. П. Пшеничников, В. И. Короткова, А. М. Бикчурин // Телекоммуникационные и вычислительные системы : юбилейный сборник трудов XXX Международного научно-технического форума. — Москва, 2022. — С. 90–94.

6. Короткова В. И. Интеллектуальная транспортная система на основе Интернета вещей / Ш. И. Исобоев, А. П. Пшеничников, В. И. Короткова // Телекоммуникационные и вычислительные системы: юбилейный сборник трудов XXX Международного научно-технического форума. — Москва, 2022. — С. 84–89.

7. Короткова В. И. Технологическая архитектура мультисервисной распределённой корпоративной сети связи / О. А. Слатина, В. И. Короткова, А. П. Пшеничников // Телекоммуникации и информационные технологии. — 2023. — Т. 10, № 1. — С. 145–154.

8. Короткова В. И. Технологии и протоколы туннелирования в инфокоммуникационных сетях / С. А. Козлов, Д. А. Кулагин, В. И. Короткова // Телекоммуникации и информационные технологии. — 2024. — Т. 11, № 2. — С. 11–19.

9. Короткова В. И. Функциональная модель сети доступа мультисервисной сети связи / В. И. Короткова, К. Ю. Новодерёжкин, А. П. Пшеничников // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. — 2025. — Т. 16, № 2. — С. 15–22.

10. Короткова В. И. Метод оценки задержек пакетов сообщений в мультисервисных узлах доступа / В. И. Короткова, А. П. Пшеничников, М. А. Ярыгин // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. — 2026. — № 1. — С. 27–37.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

11. Программа для оценки задержек пакетов в очередях коммутаторов мультисервисных узлов доступа на языке программирования Python: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026614150 / В. И. Короткова, А. П. Пшеничников, М. А. Ярыгин; правообладатель — Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» — Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12 февраля 2026 г.