

На правах рукописи

Кочеткова Ирина Андреевна

**МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРИОРИТЕТНОГО ДОСТУПА В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ
С ЭЛАСТИЧНЫМ И ПОТОКОВЫМ ТРАФИКОМ**

1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре теории вероятностей и кибербезопасности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории вероятностей и кибербезопасности Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)
Самуйлов Константин Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей связи и систем коммутации Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ)
Степанов Сергей Николаевич,

доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой программной инженерии Национального исследовательского Томского государственного университета (ТГУ)
Моисеев Александр Николаевич,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ)
Парамонов Александр Иванович,

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории телекоммуникационных систем Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН)
Семенова Ольга Валерьевна

Защита диссертации состоится «7» ноября 2025 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета ПДС 0200.006 при Российском университете дружбы народов имени Патриса Лумумбы по адресу: г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы по адресу: 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 6.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
ПДС 0200.006, к.ф.-м.н., доцент

М.Н. Геворкян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Современные сети связи активно эволюционируют: технологии четвертого (4G) и пятого поколений (5G) постепенно дополняются инновационными решениями как в проводной, так и в беспроводной среде. Расширение спектра услуг – от потоковой передачи данных до интернета вещей – формирует новые требования к инфраструктуре: помимо увеличения пропускной способности, критически важными становятся снижение задержек и повышение надежности каналов связи. Эти требования стимулируют разработку принципиально новых архитектур, таких как сети шестого поколения (6G) или сеть 2030, где ключевым элементом является обеспечение качества обслуживания (quality of service, QoS) для разнородных приложений.

Ключевой характеристикой современных услуг является вариативность требований к скорости передачи данных: она может быть гарантированной, адаптивной в пределах максимального значения, или полностью динамической. Для анализа таких сценариев трафик принято разделять на два типа: потоковый и эластичный. В первом случае пользователь задает время предоставления услуги, а скорость передачи остается фиксированной или регулируется в рамках заданных порогов. Объем переданных данных прямо зависит от выбранной скорости. Во втором случае пользователь определяет объем данных, а скорость адаптируется под доступный ресурс сети. Время завершения услуги при этом зависит от текущей пропускной способности канала. Дополнительным критерием классификации служит режим передачи данных: одноадресный «точка–точка», когда данные доставляются одному получателю, и многоадресный «точка–много точек», когда осуществляется одновременная передача одних данных множеству пользователей.

Приоритизация услуг в сетях 5G – это механизм управления распределением ресурсов между разнородными сервисами и пользователями, основанный на классах QoS. В условиях перегрузки сети, когда доступный ресурс не покрывает потребности всех сессий, система выделяет ресурсы в первую очередь для высокоприоритетных услуг. В штатных режимах работы низкой и нормальной нагрузки приоритеты используются для оптимизации QoS. Важным элементом такой системы являются приоритетные события – внешние или внутренние триггеры, которые изменяют объем ресурса, доступного для определенных классов трафика, и требования к QoS для текущих сессий.

Технология нарезки сети (network slicing), включая распределение радиоресурсов, формирует гибкую архитектуру для управления приоритетным доступом. Каждый изолированный сегмент сети обслуживает трафик определенного класса, однако ресурсы между сегментами могут динамически перераспределяться в зависимости от текущих условий. Контроллер, осуществляющий мониторинг и управление нарезкой, обладает высшим приоритетом при принятии решений.

Ограниченность доступного радиочастотного спектра стимулирует внедрение систем совместного доступа (spectrum sharing), которые делятся на два типа. В лицензируемых диапазонах два оператора делят выделенный частотный ресурс, а трафик владельца лицензии имеет безусловный приоритет.

В нелицензируемых диапазонах, например, в частотах Wi-Fi, приоритетным считается трафик сети Wi-Fi, но его обслуживание зависит от алгоритмов, которые предотвращают коллизии с мобильным трафиком. При моделировании таких систем необходимо учитывать иерархию приоритетов: в первом случае гарантии QoS для владельца лицензии, во втором – баланс между справедливым распределением ресурса и соблюдением соглашения о качестве обслуживания.

Моделирование ресурсов в сетях 5G требует учета неоднородности беспроводной среды, которая напрямую влияет на доступную пропускную способность и качество связи. Пользователи вблизи базовой станции в зоне с высоким отношением сигнала к шуму получают максимальную скорость. Удаленные устройства сталкиваются с затуханием сигнала и снижением скорости. Прямая видимость обеспечивает стабильный канал связи, но блокировки пути прямой видимости вызывают потери.

Для моделирования и анализа беспроводных сетей используются методы теории массового обслуживания и математической теории телетрафика. Этот аппарат развивается и адаптируется под новые особенности управления приоритетным доступом и обслуживанием пользователей. В том числе, за счет использования моделей стохастической геометрии. Приоритетные системы массового обслуживания учитывают различные варианты приоритетов. Они позволяют исследовать мультисервисные сценарии с различными политиками доступа к обслуживающим приборам и очереди. В том числе, за счет вытеснения более приоритетными заявками менее приоритетных.

Для учета особенностей приоритизации услуг в беспроводных сетях 4G и 5G в моделях математической теории телетрафика должна учитываться возможность снижения скорости передачи трафика, структура ресурса – постоянный или изменяемый, влияние внешних событий, а также приоритеты для пар классов заявок.

В результате возникает научная проблема, имеющая важное народнохозяйственное значение – анализ и расчет показателей качества обслуживания и эффективности использования ресурсов в беспроводных сетях приоритетного доступа, включая сети 5G/6G, в условиях совместного обслуживания мультисервисного эластичного и потокового трафика, снижения объема выделенных ресурсов, прерывания и приостановки обслуживания сессий, перераспределения и ненадежности ресурсов.

Степень разработанности темы исследования.

Значительный вклад в развитие данной тематики внесли следующие российские и зарубежные ученые и исследователи. В области методов анализа показателей эффективности беспроводных сетей: Андреев С.Д., Барабанова Е.А., Бегишев В.О., Вишневский В.М., Вытовтов К.А., Гайдамака Ю.В., Гольдштейн Б.С., Деарт В.Ю., Ибрагимов Б.Г., Киричек Р.В., Крук Е.А., Кулябов Д.С., Кучерявый А.Е., Кучерявый Е.А., Ляхов А.И., Маколкина М.А., Молчанов Д.А., Мутханна А.С.А., Орлов Ю.Н., Парамонов А.И., Пшеничников А.П., Росляков А.В., Самуйлов К.Е., Смелянский Р.Л., Соколов Н.А., Хоров Е.М., Цитович И.И., Яновский Г.Г., Akyildiz I., Araniti G., Caire G., Chatzinotas S., Ghrayeb A., Ksentini A., Popovski P., Taleb T., Verikoukis C., Whitt W. и др.

По моделям математической теории телетрафика с потоковым и эластичным трафиком: Башарин Г.П., Гайдамака Ю.В., Дудин А.Н., Зорин А.В., Рыков В.В., Самуйлов К.Е., Степанов С.Н., Федоткин М.А., Яшков С.Ф., Voxma O., Iversen V.B., Fiems D., Kelly F.P., Ross K.W. и др. По ресурсным системам массового обслуживания: Гайдамака Ю.В., Моисеев А.Н., Моисеева С.П., Наумов В.А., Самуйлов К.Е., Сопин Э.С., Тихоненко О.М. По управляемым системам массового обслуживания: Ефросинин Д.В., Зорин А.В., Рыков В.В., Федоткин М.А., Ховард Р.А.

По системам массового обслуживания с ненадежными приборами и случайной среде: Вишневский В.М., Дудин А.Н., Меликов А.З., Моисеева С.П., Назаров А.А., Нетес В.А., Пауль С.В., Рыков В.В., Goswami V., Jain M., Krishnamoorthy A., Panda G., Sztrik J. и др. По системам массового обслуживания с повторными вызовами и орбитами: Вишневский В.М., Ефросинин Д.В., Меликов А.З., Моисеев А.Н., Морозов Е.В., Назаров А.А., Пауль С.В., Румянцев А.С., Степанов С.Н., Phung-Duc T., Sztrik J., Wang J. и др.

Отметим и других ученых, которые внесли значительный вклад в развитие методов математической теории телетрафика и теории массового обслуживания, включая приоритетные системы: Бронштейн О.И., Гнеденко Б.В., Горцев А.М., Джейсуол Н., Димитров Б.Н., Духовный И.М., Зейфман А.И., Ивницкий В.А., Карташевский В.Г., Клименок В.И., Климов Г.П., Нейман В.И., Печинкин А.В., Пшеничников А.П., Разумчик Р.В., Сатин Я.А., Семенова О.В., Соколов Н.А., Терпугов А.Ф., Тюрликов А.М., Фархадов М.П., Харкевич А.Д., Хинчин А.Я., Хохлов Ю.С., Цициашвили Г.Ш., Шнепс М.А., Bruneel H., Chaudhry M., Pagano M., Walraevens J. и др.

Цель исследования состоит в создании теоретических основ и комплекса марковских моделей для анализа и расчета показателей эффективности приоритетного доступа эластичного и потокового трафика с применением механизмов прерывания и приостановки сессии, снижения скорости передачи и мощности сигнала.

Достижение сформулированной цели достигается путем решения следующих **задач исследования**:

1. Разработка методологии построения и анализа моделей обслуживания мультисервисного трафика в условиях приоритетного доступа.
2. Разработка моделей приоритетного обслуживания нескольких классов эластичного и потокового трафика в условиях снижения объема выделенных ресурсов, прерывания и приостановки обслуживания сессий.
3. Разработка моделей приоритетного обслуживания мультисервисного трафика в среде ненадежных ресурсов и политики перераспределения ресурсов методом сетевой нарезки.
4. Разработка алгоритмов для анализа и расчета показателей эффективности приоритетного доступа в беспроводных сетях, включая модель марковского процесса принятия решений.

Научная новизна результатов исследования состоит в следующем:

1. Комплекс моделей приоритетного доступа эластичного и потокового трафика в беспроводных сетях построен в единой концепции описания схем приоритетного доступа в виде матрицы приоритетов, позволяющей задавать приоритет для каждой пары классов заявок, возможность снижать скорость, учитывать структуру и разные типы ресурса, влияние на систему внешних событий. Ранее в классификации систем с приоритетным обслуживанием по большей части предполагался линейный относительно приоритета порядок классов заявок, акцент был на порядке доступа к ресурсу – относительный или абсолютный, его применении во времени, принципе выбора заявок для вытеснения.
2. Модель доступа узкополосного и широкополосного потокового трафика учитывает задержку на попытки начала и возобновления передачи широкополосного трафика в виде системы с орбитами, а также использует дискриминаторное разделение слота времени между сессиями пропорционально требованиям к скорости передачи трафика в ресурсной системе. Ранее в моделях для анализа сверхнадежной передачи с малой задержкой и широкополосной связи использовались системы с очередями и равным разделением кадра времени. Модель доступа одноадресного и многоадресного потокового трафика реализует взаимный приоритет – многоадресный трафик прерывает одноадресный трафик, который в свою очередь, снижает скорость многоадресной сессии, а также учитывает два режима мультимедиа – завершение сессии по первому и последнему пользователям. Ранее исследовались системы без приоритета многоадресного трафика и в комбинации с одним из режимов мультимедиа.
3. Модель доступа эластичного трафика с минимальной скоростью передачи реализует приоритет посредством прерывания менее приоритетной сессии. Ранее приоритетное обслуживание нескольких классов эластичного трафика моделировалось с помощью дискриминаторного разделения ресурса между сессиями пропорционально весовым коэффициентам. Модель доступа эластичного трафика с управляемым по сигналам перераспределением объема ресурса учитывает выбор объема перераспределения ресурса при помощи марковского процесса принятия решений. Ранее в системах массового обслуживания для анализа нарезки радиоресурсов перераспределение происходило по внутренним, связанным с сессиями, событиям.
4. Модель доступа эластичного трафика с минимальной скоростью передачи и ненадежным ресурсом реализует приоритет посредством приостановки сессии и размещения ее в конечную очередь для ожидания возобновления обслуживания, а также учитывает марковский входящий поток. Ранее системы с ожиданием эластичного трафика исследовались для надежного ресурса и бесконечной очереди.
5. Для модели доступа потокового трафика к ненадежному ресурсу алгоритм расчета среднего числа приостановленных сессий записан в скалярном виде. Ранее расчет такой характеристики проводился матричным решением системы уравнений равновесия. Модель доступа потокового трафика к частично ненадежному ресурсу реализует выбор направления нагрузки на ненадежный или надежный ресурс при помощи управляемой системы

массового обслуживания. Ранее системы с частичным отказом ресурса исследовались с фиксированной политикой управления. Модель доступа потокового трафика со случайным требованием к объему ненадежного ресурса учитывает зависимое занятие двух типов ресурса – мощности сигнала и слота времени. Ранее ресурсные системы исследовались с надежными приборами и независимым занятием разных ресурсов.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость результатов работы обоснована тем, что доказаны теоремы, леммы и утверждения, позволяющие вычислять стационарные распределения вероятностей состояний моделей систем приоритетного доступа в беспроводных сетях, их показатели эффективности, а также осуществлять выбор политик управления работой этих систем; применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс методов математической теории телетрафика, теории массового обслуживания и дискретно-событийного статистического моделирования; изложены различные схемы приоритетного доступа эластичного и потокового трафика, типы ресурса, приоритетные события, механизмы реализации приоритета и т.п.; изучено влияние на эффективность приоритетного доступа повторных попыток возобновить обслуживание, многоадресного режима передачи данных, марковского потока запросов на передачу трафика, полного и частичного отказа ресурса; проведена модернизация существующей классификации моделей математической теории телетрафика и теории массового обслуживания в обозначениях Башарина – Кендалла, отражающая в виде матрицы приоритетов особенности приоритетного доступа в современных беспроводных сетях.

Практическая значимость работы. Значение полученных результатов работы для практики подтверждается тем, что разработаны алгоритмы расчета показателей эффективности приоритетного доступа в беспроводных сетях для сценариев сверхнадежной передачи данных с малой задержкой и критически важных данных, в миллиметровом диапазоне и нелицензируемом диапазоне радиочастот, при использовании технологии нарезки сети и системы совместного использования радиочастот; созданы модели для определения оптимальных для заданных целевых функций политики управления перераспределением ресурса между сегментами сети и политики управления распределением нагрузки при совместном использовании радиочастот; представлены рекомендации по выбору параметра потока попыток возобновления обслуживания широкополосного трафика, уровней скорости широкополосного трафика и видеоконференции, параметра потока сигналов контроллера нарезки сети.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в работе задач исследования использовались методы математической теории телетрафика, теории массового обслуживания, марковских случайных процессов, марковских процессов принятия решения, стохастической геометрии, теории вероятностей, дискретно-событийного статистического моделирования.

Положения, выносимые на защиту.

1. Комплекс моделей схем приоритетного доступа эластичного и потокового трафика в виде марковских систем массового обслуживания и алгоритмы расчета характеристик случайных величин прерывания сессии, скорости передачи, объема используемого ресурса применимы для анализа сценариев сетей четвертого и пятого поколений с несколькими классами пользователей, ненадежными и совместно используемыми ресурсами.
2. Модель доступа узкополосного и широкополосного потокового трафика и матричный алгоритм расчета стационарного распределения позволяют рассчитать показатели эффективности сверхнадежной передачи с малой задержкой и широкополосной связи – вероятность прерывания и среднюю скорость сессии, а также позволяют настроить параметр потока попыток возобновления обслуживания и уровни скорости широкополосного трафика. Модель доступа одноадресного и многоадресного потокового трафика и рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения позволяют настроить уровни скорости видеоконференции для максимизации ее среднего значения при ограничениях на вероятность блокировки и вероятность прерывания сессии.
3. Модель доступа эластичного трафика с минимальной скоростью передачи позволяет рассчитать показатели эффективности обслуживания трафика в нелицензируемых радиочастотах – вероятность прерывания сессии, вероятность снижения скорости ниже минимального порога и среднюю скорость. Модель доступа эластичного трафика с управляемым по сигналам перераспределением объема ресурса применима для определения оптимальной политики управления перераспределением ресурса между сегментами сети при нарезке радиоресурсов – объемов ресурса каждого из сегментов – по критерию максимума взвешенной суммы коэффициентов соответствия равному делению ресурса, результативности сигналов контроллера и использования ресурса, а также позволяет настроить параметр потока сигналов контроллера для максимизации взвешенной суммы коэффициентов.
4. Модель доступа эластичного трафика с минимальной скоростью передачи и ненадежным ресурсом, матричные алгоритмы расчета стационарного распределения и символьного вычисления преобразования Лапласа-Стилтьеса времени передачи трафика позволяют рассчитать показатели эффективности обслуживания критически важных данных в миллиметровом диапазоне – моменты времени передачи данных.
5. Модель доступа потокового трафика к ненадежному ресурсу, рекуррентный алгоритм в скалярном виде и матричные алгоритмы для символьного расчета периода занятости системы позволяют рассчитать показатели эффективности совместного использования радиочастот – моменты длительности периода занятости. Модель доступа потокового трафика к частично ненадежному ресурсу применима для определения оптимальной политики управления распределением нагрузки при совместном использовании радиочастот – объемом совместно используемого ресурса и порогами гистерезисного управления – по критерию минимума средней стоимости использования ресурса и обслуживания сессий. Модель доступа потокового трафика со

случайным требованием к объему ненадежного ресурса и рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения позволяют рассчитать показатели эффективности адаптивного управления мощностью сигнала – вероятность прерывания и среднюю скорости сессии.

Степень достоверности результатов работы. Достоверность полученных результатов подтверждается тем, что теория построена на известных методах теории массового обслуживания и математической теории телетрафика, используемых при доказательствах теорем, лемм и утверждений; идея базируется на анализе и обобщении передового опыта в обеспечении приоритетного доступа в беспроводных сетях; установлено качественное совпадение частных случаев разработанных автором моделей с известными моделями теории массового обслуживания и математической теории телетрафика; использован современный метод дискретно-событийного статистического моделирования для верификации результатов работы.

Апробация результатов работы.

По результатам работы автор выступил с пленарными докладами на международных конференциях 5th International Conference on Recent Trends in Information Technology, ICRTIT (2016: Ченнаи, Индия), 2nd International Conference on Future Networks and Distributed Systems, ICFNDS (2018: Амман, Иордания), 23rd International Conference named after A. F. Terpugov on Information Technologies and Mathematical Modelling, ITMM (2024: Карши, Узбекистан).

Основные положения работы были апробированы на следующих международных конференциях – International Conference on Analytical and Stochastic Modelling Techniques and Applications, ASMTA (2016: Кардифф, Великобритания, 2019: Москва), IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, European Conference on Modelling and Simulation, ECMS (2015: Албена, Болгария, 2017: Будапешт, Венгрия), IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM (2016: Вашингтон, США), International Conference on Future Networks and Distributed Systems, ICFNDS (2018: Амман, Иордания), International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics, ICNAAM (2014, 2018: Родос, Греция), International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT (2014: Санкт-Петербург, 2015: Брно, Чехия, 2016: Лиссабон, Португалия, 2017: Мюнхен, Германия, 2018: Москва), International Symposium on Computer and Information Sciences, ISCIS (2016: Краков, Польша), ITU Kaleidoscope Academic Conference, K (2014: Санкт-Петербург), International Conference on Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networks and Systems, NEW2AN (2012, 2013, 2015-2020: Санкт-Петербург).

Положения работы обсуждались также на следующих научных мероприятиях – Международной конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь», DCCN (2016, 2019, 2022, 2024: Москва, ИПУ РАН, РУДН), Международной конференции имени А.Ф. Терпугова «Информационные технологии и математическое моделирование», ITMM (2016: Катунь, 2017: Казань, 2019: Саратов, 2023: Томск, ТГУ), Международной конференции «Современные сетевые технологии», MoNeTec (2014: Москва, ВМК МГУ), Международной отраслевой

научно-технической конференции «Технологии информационного общества» (2012-2017: Москва, МТУСИ), Международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии и ИТ-образование» (2013, 2014, 2016, 2017, 2019: Москва, ВМК МГУ), Всероссийском совещании по проблемам управления, ВСПУ (2014, 2019, 2024: Москва, ИПУ РАН), Международной научной конференции «Математическое и программное обеспечение информационных, технических и экономических систем» (2018-2020: Томск, ТГУ), Молодежной научной конференции «Задачи современной информатики» (2015: Москва, ФИЦ ИУ РАН), Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике, ВСПИМ (2018, 2019: Сочи, ФИЦ ИУ РАН), Международном семинаре по прикладным проблемам в теории вероятностей и математической статистике, АРТР+MS (2017: Реджо-ди-Калабрия, Италия, 2018: Лиссабон, Португалия, ФИЦ ИУ РАН, РУДН), Всероссийской конференции с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем», ИТТММ (2014-2024: Москва, РУДН), а также на научном межвузовском семинаре «Современные телекоммуникации и математическая теория телетрафика» РУДН, МТУСИ, ИППИ РАН, ТГУ, ИПМ РАН (2021, 2024), на научном семинаре кафедры автоматизации систем вычислительных комплексов ВМК МГУ в рамках консорциума «Сетевые и облачные технологии» (2025).

За часть научных результатов работы автор удостоен премии Правительства Москвы молодым ученым в номинации «Информационно-коммуникационные технологии» за разработку комплекса вероятностных моделей схем приоритетного управления радиоресурсами беспроводных сетей последующих поколений (2016).

Реализация результатов работы.

Научные результаты работы использованы в следующих 6 научно-исследовательских работах (НИР), выполненных под непосредственным руководством автора:

- Разработка моделей и алгоритмов нарезки радиоресурсов и приоритетного доступа в беспроводной сети 6G, рук. Кочеткова И.А. // проект системы грантовой поддержки научных проектов РУДН № 025319-2-000 (2023-2024);
- Исследование и разработка моделей и интеллектуальных алгоритмов совместного обслуживания трафика с малыми задержками и широкополосного доступа в беспроводных сетях пятого поколения, рук. Гудкова И.А. // грант РФФИ стабильность № 20-37-70079 (2020-2021);
- Вероятностные модели сегментации радиоресурсов беспроводных сетей и методы расчета характеристик обслуживания пользователей, рук. Гудкова И.А. // грант совета по грантам Президента РФ № МК-2588.2019.9 (2019-2020);
- Разработка информационной технологии, математического, алгоритмического и программного обеспечения для моделирования взаимодействия устройств в беспроводных сетях пятого поколения, рук. Гудкова И.А. // стипендия совета по грантам Президента РФ № СП-2987.2016.5 (2016-2018);

- Исследование и разработка информационно-телекоммуникационной технологии и моделей беспроводных межмашинных взаимодействий для управления городской инфраструктурой, рук. Гудкова И.А. // грант РФФИ мол_а_мос № 15-37-70016 (2016-2017);
- Разработка комплекса марковских моделей для анализа показателей эффективности схем доступа в беспроводных мультисервисных сетях с приоритетным обслуживанием, рук. Гудкова И.А. // грант РФФИ мол_а № 16-37-00421 (2016-2017).

Научные результаты работы использованы также в НИР по другим грантам РФФИ и РФФИ, в рамках государственного задания Минобрнауки РФ, выполненных при участии автора.

Научные результаты работы использованы в учебном процессе в РУДН на факультете физико-математических и естественных наук в разработанных и читаемых автором студентам 3 курса бакалавриата направлений подготовки 02.03.01 «Математика и компьютерные науки», 02.03.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии» и 09.03.03 «Прикладная информатика» дисциплинах «Модели мультисервисных сетей с приоритетами» и «Анализ приоритетного доступа в мультисервисных сетях».

Публикации. Основные научные результаты диссертации изложены в 55 опубликованных работах, из них 31 работа опубликована в изданиях, индексируемых в международных базах индексации и цитирования (МБЦ) Web of Science и Scopus, 12 работ в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в наукометрической базе данных RSCI, 1 работа в рецензируемом научном издании, рекомендованном перечнем Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки РФ (Перечень ВАК РФ). По теме работы автор также имеет 7 зарегистрированных свидетельств на программу для электронных вычислительных машин, 2 монографии.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 1.2.3 «Теоретическая информатика, кибернетика»:

- п. 9 «Математическая теория исследования операций» в части комплекса моделей приоритетного доступа эластичного и потокового трафика в беспроводных сетях (результат 1), исследования политики управления перераспределением ресурса при нарезке радиоресурсов (результат 3) и политики управления распределением нагрузки между ненадежным и надежным ресурсами при совместном использовании радиочастот (результат 5);
- п. 11 «Распределенные многопользовательские системы» в части моделирования системы доступа виртуальных операторов к распределенному ресурсу базового оператора при нарезке радиоресурсов (результат 3) и моделирования системы доступа пользователей мобильного оператора к распределенному ресурсу при совместном использовании радиочастот (результат 5);

- п. 12 «Модели информационных процессов и структур» в части моделирования процесса предоставления услуг видео по требованию и видеоконференции (результат 2) и процесса передачи трафика в нелицензируемых радиочастотах (результат 3);
- п. 23 «Новые интернет - технологии, включая средства поиска, анализа и фильтрации информации» в части моделирования перераспределения ресурса для технологии нарезки радиоресурсов (результат 3) и моделирования процесса передачи данных в миллиметровом диапазоне (результат 4);
- п. 25 «Методы высоконадежной обработки информации и обеспечения помехоустойчивости информационных коммуникаций для целей передачи, хранения и защиты информации» в части моделирования сверхнадежной передачи информации с малой задержкой (результат 2).

Личный вклад автора. Автор лично получил основные результаты диссертации. Автор лично участвовал во всех этапах исследования, выполнил апробацию результатов исследования, разработал сценарии для проведения численных экспериментов. При непосредственном участии автора обработаны результаты численных экспериментов, выполнена их интерпретация, подготовлены основные публикации по работе.

Объем и структура работы. Текст диссертации включает в себя введение, основную часть из пяти глав и заключение. Каждая глава разделена на 6 разделов, а раздел – на 3 параграфа. Диссертация включает в себя список литературы из 400 библиографических ссылок. Работа изложена на 340 страницах текста, содержит 50 рисунков и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы работы, анализ состояния исследований в предметной области, цель и задачи исследования. Отражены научная новизна результатов работы, ее теоретическая и практическая значимость, использованные методы и положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о достоверности и апробации результатов работы, соответствии паспорту специальности, личном вкладе и основных публикациях автора.

В главе 1 проведен аналитический обзор вопросов приоритетного обслуживания трафика в мультисервисных беспроводных сетях. Описана модель «тройной услуги» с одноадресным, многоадресным и эластичным трафиком, схема которой показана на рисунке 1. Приведены особенности моделирования радиоресурса, а именно построены модели требования к ресурсу и затухания сигнала (path loss, PL) для анализа случайного требования к ресурсу, описана соответствующая ресурсная система массового обслуживания (PeCМО). Отдельно проанализированы системы нарезки радиоресурсов и совместного использования нелицензируемых и лицензируемых радиочастот.

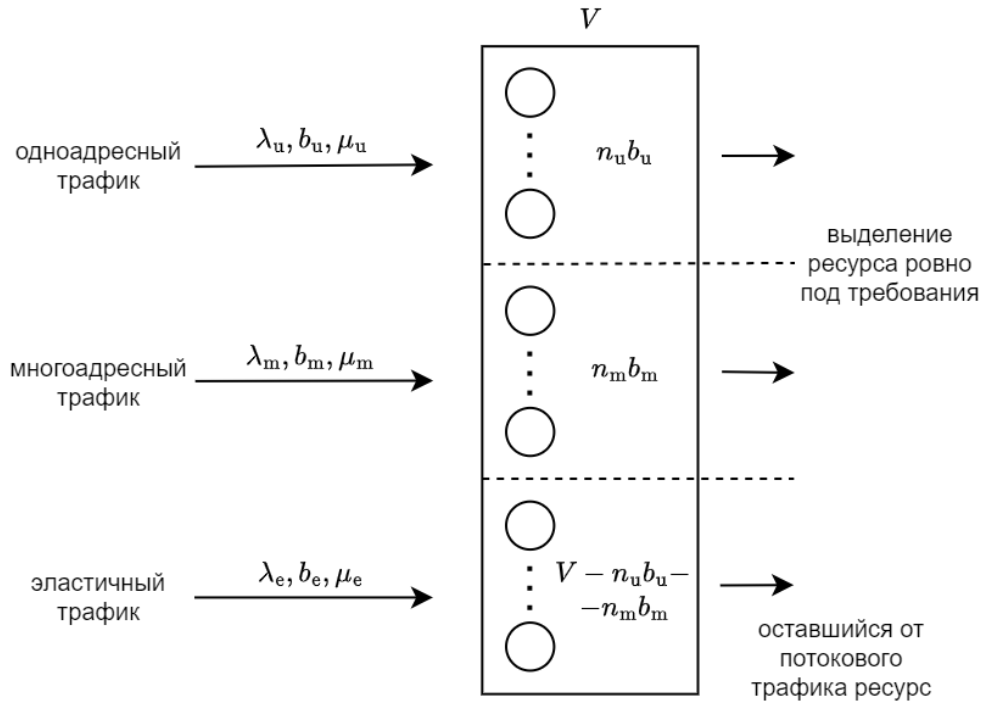


Рисунок 1 – Схема модели «тройной услуги»

В разделе 1.6 описан комплекс разработанных моделей. Предложено использовать матрицу приоритетов $\mathbf{F}$ для учета особенностей приоритизации услуг в беспроводных сетях и дополнительной информации о структуре схемы приоритетного доступа. СМО кодируется в нотации Башарина – Кендалла как $A | B | \bullet | \bullet | \mathbf{F}$, где A входящий поток заявок, B обслуживание, третий и четвертый элементы – системы обслуживающих приборов и очередей.

В строках матрицы $\mathbf{F}$ расположены события $e \in \mathcal{E}$ приоритетного доступа, они связаны с услугами различных классов или внешней средой и влияют на объем доступного ресурса для сессий различных классов или на объем занимаемого сессиями ресурса. Конкретный перечень фактически соотносится со списком событий, которые используются при дискретно-событийном стохастическом моделировании системы. В столбцах матрицы $\mathbf{F}$ расположены механизмы $p \in \mathcal{P}$ реализации приоритета с указанием, в случае абсолютного приоритета, траектории заявки после вытеснения.

В элементах матрицы приоритетов представлены две другие компоненты приоритетного доступа. Индекс n_{ep} обозначает порядковый номер применения механизма, а w_{ep} описывает принцип выбора заявок для применения механизма

$$\mathbf{F}: f_{ep} = (n_{ep}, w_{ep}), \quad e \in \mathcal{E}, \quad p \in \mathcal{P}. \quad (1)$$

Ниже вид матрицы приоритетов проиллюстрирован на примере модели главы 2.

В **главе 2** исследованы модели с потоковым трафиком и постоянным объемом ресурса. В **разделах 2.1–2.4** исследованы модели приоритетного доступа двух классов одноадресного потокового трафика, генерируемого при сверхнадежной передаче данных с малой задержкой (ultra reliable low latency communications, URLLC) и широкополосной связи (enhanced mobile broadband, eMBB). Приоритетным является трафик URLLC, объем V ресурса постоянный. Рассмотрены сценарии, где передача трафика URLLC занимает существенно

меньше времени, чем передача трафика eMBB. Поскольку объем данных URLLC невелик, для обеспечения малой задержки передачи достаточно низкой скорости $d=1$. В то же время трафик eMBB характеризуется высокой скоростью b . Поэтому трафик URLLC называется в работе узкополосным, а трафик eMBB – широкополосным.

Рассмотрены несколько сценариев обслуживания широкополосного трафика. В первом случае передача не допускает задержек, а во втором – допускает. Скорость передачи может быть постоянной или изменяться по уровням скорости. Для обеспечения приоритета узкополосного трафика применяются различные механизмы доступа широкополосного трафика: прерывание и приостановка обслуживания, снижение скорости передачи и мощности сигнала. Для моделирования механизма приостановки обслуживания используется СМО с двумя орбитами, а для механизма снижения мощности сигнала – РеСМО с двумя типами ресурсов.

В разделе 2.2 матрицы интенсивностей переходов представлены в блочно-трехдиагональном виде. Это позволило рассчитать стационарное распределение с помощью матричного алгоритма. В качестве альтернативы матричному расчету стационарного распределения предложен алгоритм снижения размерности системы уравнений равновесия в скалярном виде. В разделе 2.3 для ресурсных систем найдены вероятности занятия ресурса и условные вероятности выделения ресурса.

Для схемы со снижением мощности и прерыванием обслуживания широкополосного трафика, предположено равное разделение кадра $T=1$ между всеми сессиями и без разделения ресурса по частоте F . Мощность P сигнала устанавливается таким образом, чтобы обеспечить необходимую скорость $d=1$ передачи узкополосного трафика и скорость b передачи широкополосного трафика для каждой сессии. Это СМО $M_2 \mid M_2 \mid V, \langle T, P \rangle \mid 0 \mid \mathbf{F}$ с матрицей приоритетов

		p	узкополосный трафик обслуживается		широкополосный трафик обслуживается		
			e	e	e	e	e
узкополосный трафик	поступление	1	(1,2)	0	(1,2)	(2,1)	0
	завершение обслуживания	2	0	(1,2)	0	0	(1,2)
широкополосный трафик	поступление	3	(1,2)	0	(1,2)	0	0
	завершение обслуживания	4	0	(1,2)	0	0	(1,2)

Обозначения в матрице сохранены как в диссертационной работе: $p=1$ прерывание обслуживания, $p=5$ уменьшение и $p=6$ увеличение доли продолжительности кадра, $p=7$ и $p=8$ снижение и повышение мощности сигнала, $w=1$ одна сессия равновероятно, $w=2$ все сессии. Символ $\Downarrow$ означает, что применение одного механизма приоритетного доступа влечет за собой применение второго механизма.

Функционирование системы описано при помощи случайного процесса (СП) $X(t)$ над пространством состояний

$$\mathcal{X} = \{(n, m): n \geq 0, m \geq 0, n + bm \leq V\}, \quad (2)$$

где n и m число обслуживаемых сессий узкополосного и широкополосного трафика соответственно. Требование к ресурсу – ширине y_f радиочастот, доле y_t длительности кадра и мощности y_p передающей антенны – для сессии узкополосного и широкополосного трафика в состоянии (n, m) имеет вид соответственно

$$y_1(n, m) = \left(y_1^f = F, y_1^t = \frac{1}{n + m}, y_1^p = \frac{PL(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left(2^{(n+m)/F} - 1 \right) \right), \quad (3)$$

$$(n, m) \in \mathcal{X} \setminus \{\mathbf{0}\},$$

$$y_2(n, m) = \left(y_2^f = F, y_2^t = \frac{1}{n + m}, y_2^p = \frac{PL(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left(2^{b(n+m)/F} - 1 \right) \right), \quad (4)$$

$$(n, m) \in \mathcal{X} \setminus \{\mathbf{0}\},$$

$$y_1(\mathbf{0}) = y_2(\mathbf{0}) = (0, 0, 0), \quad (5)$$

где G_t и G_r коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, N_0 и I_0 мощности шума и интерференции. Тогда множество вариантов занятия ресурса в состоянии (n, m) представимо в виде

$$\mathcal{Y}(n, m) = \{(y_{11}, \dots, y_{1n}, y_{21}, \dots, y_{2m}) = (y_1[n], y_2[m]):$$

$$y_{1i} = (y_{1i}^f, y_{1i}^t, y_{1i}^p), y_{1i}^f = F, y_{1i}^t = \frac{1}{n + m},$$

$$y_{1i}^p = \frac{PL_{1i}(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left(2^{(n+m)/F} - 1 \right), PL_{1i} \geq 1, y_{1i}^p \leq P, i = 1, \dots, n, \quad (6)$$

$$y_{2i} = (y_{2i}^f, y_{2i}^t, y_{2i}^p), y_{2i}^f = F, y_{2i}^t = \frac{1}{n + m},$$

$$y_{2i}^p = \frac{PL_{2i}(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left(2^{b(n+m)/F} - 1 \right), PL_{2i} \geq 1, y_{2i}^p \leq P, i = 1, \dots, m \},$$

$$(n, m) \in \mathcal{X} \setminus \{\mathbf{0}\},$$

$$\mathcal{Y}(\mathbf{0}) = \{(0, 0, 0)\}, \quad \mathcal{Y}(n, m) = \emptyset, \quad (n, m) \notin \mathcal{X}. \quad (7)$$

Лемма 1. Для модели с узкополосным и широкополосным потоковым трафиком и постоянным объемом ресурса, схемой со снижением мощности и прерыванием обслуживания широкополосного трафика, вероятности занятия ресурса рассчитываются по формуле

$$\Pr((\xi_1[n], \xi_2[m]) \in \mathcal{Y}(n, m)) =$$

$$= \left[F_{\xi_{PL}} \left(\frac{PG_t G_r}{N_0 + I_0} \frac{1}{2^{(n+m)/F} - 1} \right) \right]^n \cdot \left[F_{\xi_{PL}} \left(\frac{PG_t G_r}{N_0 + I_0} \frac{1}{2^{b(n+m)/F} - 1} \right) \right]^m, \quad (8)$$

$$(n, m) \in \mathcal{X},$$

где $F_{\xi_{PL}}(x)$ функция распределения мощности затухания сигнала.

Теорема 1. Для модели с узкополосным и широкополосным потоковым трафиком и постоянным объемом ресурса, схемой со снижением мощности и прерыванием обслуживания широкополосного трафика, условные вероятности того, что еще одной сессии узкополосного и широкополосного трафика соответственно может быть выделен ресурс, рассчитываются по формулам

$$p_1(\mathbf{0}) = F_{\xi_{PL}} \left(\frac{X}{2^{1/F} - 1} \right), \quad p_2(\mathbf{0}) = F_{\xi_{PL}} \left(\frac{X}{2^{b/F} - 1} \right), \quad (9)$$

$$p_1(n, m) = \left[F_{\xi_{PL}} \left(\frac{X}{2^{(n+m+1)/F} - 1} \right) \right]^{n+1} \cdot \left[F_{\xi_{PL}} \left(\frac{X}{2^{b(n+m+1)/F} - 1} \right) \right]^m \times$$

$$\times \left[F_{\xi_{PL}} \left(\frac{X}{2^{(n+m)/F} - 1} \right) \right]^{-n} \cdot \left[F_{\xi_{PL}} \left(\frac{X}{2^{b(n+m)/F} - 1} \right) \right]^{-m}, \quad (n, m) \in \mathcal{X} \setminus \{\mathbf{0}\}, \quad (10)$$

$$p_2(n, m) = \left[F_{\xi_{PL}} \left(\frac{X}{2^{(n+m+1)/F} - 1} \right) \right]^n \cdot \left[F_{\xi_{PL}} \left(\frac{X}{2^{b(n+m+1)/F} - 1} \right) \right]^{m+1} \times$$

$$\times \left[F_{\xi_{PL}} \left(\frac{X}{2^{(n+m)/F} - 1} \right) \right]^{-n} \cdot \left[F_{\xi_{PL}} \left(\frac{X}{2^{b(n+m)/F} - 1} \right) \right]^{-m}, \quad (n, m) \in \mathcal{X} \setminus \{\mathbf{0}\}, \quad (11)$$

где $X = PG_t G_r (N_0 + I_0)^{-1}$.

В разделе 2.4 приведены показатели эффективности приоритетного доступа: вероятности прерывания и приостановки обслуживания, средней скорости передачи трафика. Проиллюстрировано влияние на показатели параметра потока попыток возобновления обслуживания широкополосного трафика, уровней скорости широкополосного трафика, моделей затухания сигнала.

Одна из характеристик систем с приоритетным обслуживанием, которая отражает влияние более приоритетного трафика на менее приоритетный, в системе с приостановкой обслуживания – это вероятность такого события. На рисунке 2 представлен график, который иллюстрирует вероятность приостановки обслуживания в зависимости от доли интенсивности потока запросов на передачу узкополосного трафика. Этот сценарий актуален в условиях роста числа устройств, требующих сверхнадежной передачи данных с малой задержкой. Схема обслуживания широкополосного трафика с двумя орбитами демонстрирует более низкую вероятность приостановки обслуживания по сравнению со схемой без орбит или только с одной орбитой для приостановленных сессий.

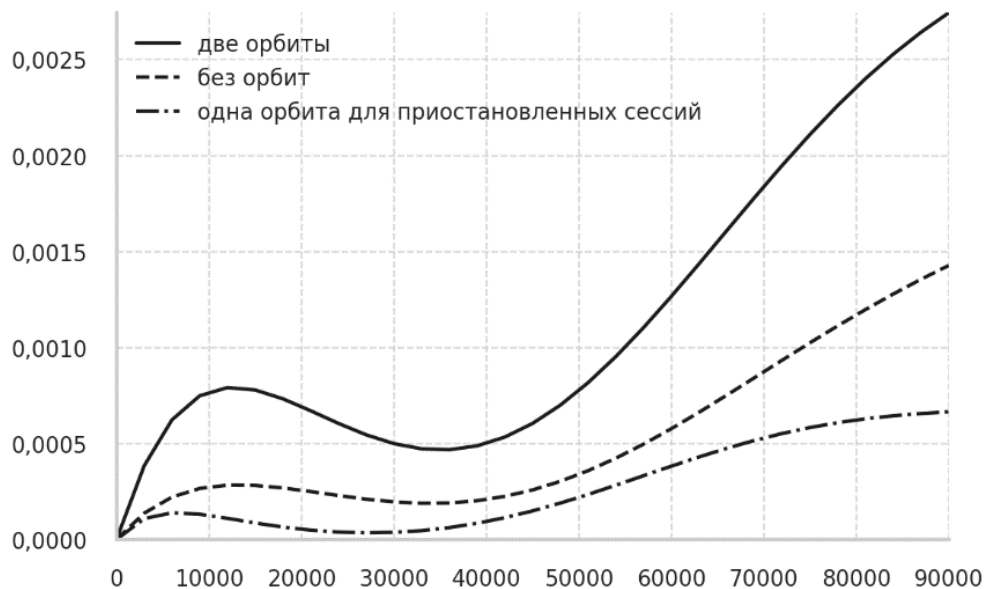


Рисунок 2 – Вероятность приостановки обслуживания сессии широкополосного трафика

В разделах 2.5–2.6 исследованы модели приоритетного доступа двух классов потокового трафика – одноадресного и многоадресного, генерируемого при предоставлении услуг видео по требованию и видеоконференции соответственно. Приоритетными являются обе услуги, объем V ресурса постоянный. Рассмотрены сценарии, где для предоставления услуги мультивещания видеоконференции сессии видео по запросу могут прерываться, а ресурс освобождается после завершения обслуживания пользователя, инициировавшего сессию. Если скорость видеоконференции допускает снижение, то это может произойти в случае необходимости предоставления услуги видео по требованию. Рассмотрен также случай с дополнительной услугой мультивещания – телевидением и освобождением ресурса после завершения обслуживания последнего из присутствующих на сессии пользователей.

Рассмотрены несколько сценариев обслуживания многоадресного трафика. Скорость b передачи постоянна или изменяется по уровням скорости. Многоадресный трафик одного класса с завершением сессии по первому пользователю или двух классов дополнительно с завершением сессии по последнему пользователю. Для обеспечения приоритета многоадресного трафика применяется механизм прерывания обслуживания одноадресного трафика, а для обеспечения приоритета одноадресного трафика – снижение скорости многоадресного трафика. Для моделирования мультивещания используется дисциплина обслуживания «прозрачных» заявок – П1 для многоадресного трафика 1-класса и П2 для многоадресного трафика 2-класса.

В разделе 2.6 предложены в скалярном виде алгоритм расчета стационарного распределения и снижения размерности системы уравнений равновесия. Обсуждается выбор уровней скорости многоадресного трафика.

Теорема 2. Для модели с одноадресным и многоадресным потоковым трафиком и постоянным объемом ресурса, схемой с прерыванием обслуживания одноадресного трафика и одной дисциплиной обслуживания многоадресного трафика, стационарное распределение СП $X(t)$ рассчитывается по формуле

$$\pi(n, m) = \frac{p(n, m)}{\sum_{(i, j) \in \mathcal{X}} p(i, j)}, \quad (n, m) \in \mathcal{X} = \{(n, m): n = 0, 1, m \geq 0, bn + m \leq V\}, \quad (12)$$

$$p(n, m) = A_0(n, m) + A_1(n, m) \cdot X, \quad (n, m) \in \mathcal{X}, \quad (13)$$

$$X = \frac{A_0(0, V-1) \cdot \lambda_2 - A_0(0, V) \cdot (\lambda_1 + V\mu_2)}{A_1(0, V) \cdot (\lambda_1 + V\mu_2) - A_1(0, V-1) \cdot \lambda_2}, \quad (14)$$

где коэффициенты $A_i(n, m)$ вычисляются по рекуррентным соотношениям

$$A_0(0, 0) = 1, \quad A_1(0, 0) = 0, \quad A_0(1, 0) = 0, \quad A_1(1, 0) = 1, \quad (15)$$

$$A_0(0, 1) = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\mu_2}, \quad A_1(0, 1) = -\frac{\mu_1}{\mu_2}, \quad A_0(1, 1) = -\frac{\lambda_1}{\mu_2}, \quad A_1(1, 1) \cdot \mu_2 = \frac{\lambda_2 + \mu_1}{\mu_2}, \quad (16)$$

$$A_i(0, m) \cdot m\mu_2 = A_i(0, m-1) \cdot [\lambda_1 + \lambda_2 + (m-1)\mu_2] - A_i(1, m-1) \cdot \mu_1 - \\ - A_i(0, m-2) \cdot \lambda_2, \quad m = 2, \dots, V-b+1, \quad i = 0, 1, \quad (17)$$

$$A_i(0, m) \cdot m\mu_2 = A_i(0, m-1) \cdot [\lambda_1 + \lambda_2 + (m-1)\mu_2] - A_i(0, m-2) \cdot \lambda_2, \\ m = V-b+2, \dots, V, \quad i = 0, 1, \quad (18)$$

$$A_i(1, m) \cdot m\mu_2 = A_i(1, m-1) \cdot [\lambda_2 + \mu_1 + (m-1)\mu_2] - A_i(0, m-1) \cdot \lambda_1 - \\ - A_i(1, m-2) \cdot \lambda_2, \quad m = 2, \dots, V-b, \quad i = 0, 1. \quad (19)$$

где λ_1 и λ_2 интенсивности пуассоновских потоков запросов на передачу многоадресного трафика с завершением сессии по первому пользователю и одноадресного трафика, $1/\mu_1$ и $1/\mu_2$ среднее экспоненциальное время сессий.

В главе 3 исследованы модели с эластичным трафиком и постоянным объемом ресурса. В разделах 3.1–3.2 – модели приоритетного доступа двух классов эластичного трафика – без требования и с требованием b к минимальной скорости передачи. Трафик соответственно генерируется при передаче данных пользователей сети нелицензируемых радиочастот Wi-Fi и пользователей оператора 4G/5G – трафик, который был выгружен в сеть Wi-Fi. Приоритетным является трафик Wi-Fi, объем V ресурса постоянный. В сети нелицензируемых радиочастот все пользователи не различимы вне зависимости от наличия требования к минимальной скорости передачи. Каждому пользователю выделяется равная доля от доступной пропускной способности.

Поскольку трафик является эластичным, любое событие, приводящее к изменению числа обслуживаемых сессий, также становится приоритетным. Если число сессий возрастает, скорость всех сессий снижается, а если уменьшается – повышается. Рассмотрены несколько сценариев обслуживания эластичного трафика с требованием к минимальной скорости передачи. Для обеспечения приоритета трафика без требования минимальной скорости применяются два механизма доступа трафика с требованием к ней: снижение скорости передачи и прерывание обслуживания. Для моделирования эластичного трафика используется дисциплина эгалитарного деления процессора (egalitarian processor sharing, EPS).

В разделе 3.2 приведены стационарное распределение в мультипликативном виде и показатели эффективности приоритетного доступа,

включая вероятность снижения скорости передачи эластичного трафика ниже минимального порога.

Теорема 3. Для модели с эластичным трафиком и полнодоступным ресурсом постоянного объема, схемой со снижением скорости передачи трафика, стационарное распределение СП $X(t)$ рассчитывается в мультипликативном виде по формуле

$$\pi(n, m) = \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)^n \left(\frac{\lambda_2}{\mu_2} \right)^m \frac{1}{V^{n+m}} \frac{(n+m)!}{n!m!} \cdot \pi(0, 0), \quad (n, m) \in \mathcal{X} \setminus \{(0, 0)\}, \quad (20)$$

$$\pi(0, 0) = \left(\sum_{(n, m) \in \mathcal{X}} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)^n \left(\frac{\lambda_2}{\mu_2} \right)^m \frac{1}{V^{n+m}} \frac{(n+m)!}{n!m!} \right)^{-1}, \quad (21)$$

где λ_1 и λ_2 интенсивности пуассоновских потоков запросов на передачу трафика без требования и с требованием к минимальной скорости, $1/\mu_1$ и $1/\mu_2$ средний экспоненциальный объем трафика, n и m число обслуживаемых сессий.

В разделах 3.3–3.6 исследованы модели приоритетного доступа двух классов нетерпеливого эластичного трафика в условиях перераспределения ресурса V между ними – между двумя сегментами сети с нарезкой радиоресурсов. При этом передача трафика допускает задержки, а скорость больше и равна минимальному порогу b , одинаковому для обоих сегментов. Приоритетными являются сообщения – сигналы контроллера для принятия решения о перераспределении ресурса. В интервалах времени между поступлениями сигналов распределение ресурса фиксированное. Когда поступает сигнал с интенсивностью δ , перераспределение может как произойти, так и не произойти. Это зависит от ожидающих начала обслуживания сессий трафика в очередях длин R_1 и R_2 . Перераспределение возможно только тогда, когда в одном из сегментов есть ожидающие сессии, а в другом их нет, и есть возможность обслуживать дополнительно хотя бы одну сессию. В противном случае перераспределение не осуществляется. При приоритетном перераспределении ресурса по сигналу применяется механизм уменьшения пропускной способности у одного из сегментов, и ее увеличение у второго. Поскольку трафик является эластичным, любое событие, приводящее к изменению числа обслуживаемых сессий, также становится приоритетным. Если число сессий возрастает, скорость всех сессий в сегменте снижается, а если уменьшается – повышается.

Рассмотрены два сценария перераспределения ресурса. В первом случае применяется фиксированная политика, основанная на одном критерии – максимизации использования ресурса. Во втором случае политика является динамической и позволяет управлять перераспределением ресурса, основываясь на трех критериях. Помимо эффективного использования ресурса, она учитывает соответствие разделения пропускной способности соглашению о качестве обслуживания и результативность сигналов, т.е. минимизирует ситуации, когда перераспределения не происходит, несмотря на наличие сигнала. Для моделирования сигналов контроллера используется СМО с сигналами – потоком внешних событий, механизма приостановки обслуживания – СМО с двумя

очередями, а для управления перераспределением ресурса – управляемая СМО (УСМО) и марковский процесс принятия решений (МППР).

В разделе 3.4 матрица интенсивностей переходов представлена в блочно-трехдиагональном виде, а стационарное распределение рассчитывается с помощью матричного алгоритма. В разделе 3.5 построен МППР с функцией вознаграждения, которая учитывает три ранее упомянутых критерия. Получен вид среднего вознаграждения для произвольной фиксированной политики и сформулирована задача оптимизации. Функционирование системы описано при помощи МППР в непрерывном времени $(\mathcal{X}, \mathcal{A}(\mathbf{x}), \mathbf{Q}_f, g(\mathbf{x}))$. Первый элемент кортежа, представляющий пространство состояний, имеет вид

$$\mathcal{X} = \{(k, n, m): 0 \leq k \leq N, 0 \leq n \leq k + R_1, 0 \leq m \leq N - k + R_2\}. \quad (22)$$

где $N = \lfloor V/b \rfloor$, k максимальное число обслуживаемых сессий трафика 1-класса, n и m число сессий трафика 1- и 2-классов в системе. Третий элемент – матрица $\mathbf{Q}_f$ интенсивностей переходов при политике f .

Действие возникает при поступлении сигнала и означает новое разделение ресурса. Поскольку в системе два сегмента, задан объем ресурса только для первого сегмента. Тогда множество действий в состоянии $\mathbf{x}$ выглядит следующим образом

$$\mathcal{A}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \{N - m, \dots, k\}, & n < k, m > N - k, n + m \leq N, \\ \{n, \dots, k\}, & n < k, m > N - k, n + m > N, \\ \{k, \dots, N - m\}, & n > k, m < N - k, n + m \leq N, \\ \{k, \dots, n\}, & n > k, m < N - k, n + m > N, \\ \emptyset, & (n \geq k) \vee (m \leq N - k), (n \leq k) \vee (m \geq N - k). \end{cases} \quad (23)$$

Лемма 2. Для модели с эластичным трафиком и перераспределением ресурса постоянного объема, схемой с политикой управления перераспределением ресурса между классами трафика, функция вознаграждения в единицу времени за пребывание в состояниях системы имеет вид

$$g(\mathbf{x}) = \omega_1 g_1(\mathbf{x}) + \omega_2 g_2(\mathbf{x}) + \omega_3 g_3(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \mathcal{X}, \quad (24)$$

где вознаграждение за соответствие равному разделению ресурса

$$g_1(\mathbf{x}) = -\bar{g}_1(\mathbf{x}), \quad \bar{g}_1(\mathbf{x}) = \begin{cases} n - k, & k < N/2, n > k, n \leq N/2, \\ N/2 - k, & k < N/2, n > k, n > N/2, \\ n - (N - k), & k > N/2, m > N - k, m \leq N/2, \\ N/2 - (N - k), & k > N/2, m > N - k, m \leq N/2, \\ 0, & (k < N/2) \vee (n > k), \\ & (k > N/2) \vee (m > N - k), \end{cases} \quad (25)$$

вознаграждение за результативность сигналов

$$g_2(\mathbf{x}) = \frac{\delta}{A(\mathbf{x})} \cdot 1\{(n < k, m > N - k) \vee (n > k, m < N - k)\}, \quad (26)$$

$$\begin{aligned}
A(\mathbf{x}) = & \lambda_1 \cdot 1\{n+1 \leq k + R_1\} + \lambda_2 \cdot 1\{m+1 \leq N - k + R_2\} + \\
& + \frac{k}{N} V \mu_1 \cdot 1\{n > 0\} + \frac{N-k}{N} V \mu_2 \cdot 1\{m > 0\} + \\
& + (n-k) \varepsilon_1 \cdot 1\{n > k\} + (m-k+N) \varepsilon_2 \cdot 1\{m > N-k\} + \delta,
\end{aligned} \tag{27}$$

где λ_1 и λ_2 интенсивности пуассоновских потоков запросов на передачу эластичного трафика 1- и 2-классов, $1/\mu_1$ и $1/\mu_2$ средний экспоненциальный объем трафика, $1/\varepsilon_1$ и $1/\varepsilon_2$ среднее экспоненциальное время на ожидание начала обслуживания нетерпеливого трафика, вознаграждение за использование ресурса

$$g_3(\mathbf{x}) = -\bar{g}_3(\mathbf{x}), \quad \bar{g}_3(\mathbf{x}) = \begin{cases} k - N + m, & n < k, m > N - k, n + m \leq N, \\ k - n, & n < k, m > N - k, n + m > N, \\ N - m - k, & n > k, m < N - k, n + m \leq N, \\ n - k, & n > k, m < N - k, n + m > N, \\ 0, & (n \geq k) \vee (m \leq N - k), \\ & (n \leq k) \vee (m \geq N - k). \end{cases} \tag{28}$$

Теорема 4. Для модели с эластичным трафиком и перераспределением ресурса постоянного объема, схемой с политикой управления перераспределением ресурса между классами трафика, среднее вознаграждение в единицу времени рассчитывается по формуле

$$\bar{g}_f = \sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} g(\mathbf{x}) \pi_f(\mathbf{x}), \tag{29}$$

где $\pi_f(\mathbf{x})$ стационарное распределение при политике f .

Рассмотрена вероятность P_f перераспределения ресурса по сигналу, т.е. вероятность того, что система находится в состоянии, при котором в случае поступления сигнала произойдет перераспределение ресурса. На рисунке 3 проиллюстрировано, как вероятность P_f и вероятность P_{bl} блокировки влияют на выбор интенсивности поступления сигналов. Изображены области значений характеристик, которые соответствуют или не соответствуют пороговым значениям. По оси абсцисс в логарифмическом масштабе отложены интенсивности δ , а по оси ординат – коэффициент λ_2/λ_1 . В зависимости от целевой функции в задачи оптимизации, выбирается δ , как показано на рисунке.

В разделе 3.6 функция вознаграждения использована в системе уравнений относительно вознаграждения за пребывание в различных состояниях системы при фиксированной политике. Для поиска оптимальной политики использованы два подхода: метод простой итерации для решения системы линейных уравнений и с применением машинного обучения. Итерационный алгоритм Ховарда Р.А. является базовым для МППР и УСМО, и для него выписаны формулы для расчета нового приближения политики на текущем шаге итерации. В качестве искусственной нейронной сети использован однослойный перцептрон, на вход которого подаются состояния системы, а на выходе генерируется оптимальная политика для каждого состояния.

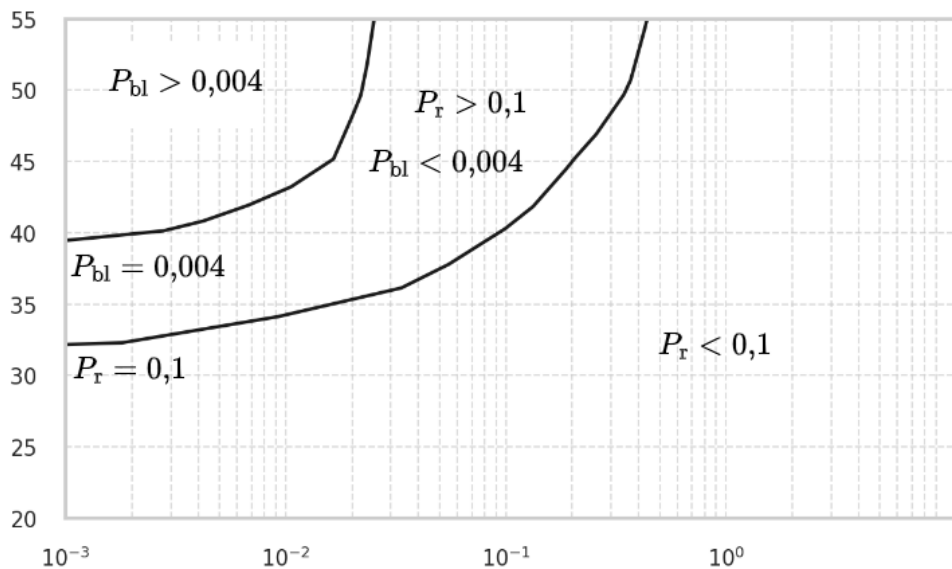


Рисунок 3 – Области возможных значений интенсивности поступления сигналов (1/с) в зависимости от коэффициента λ_2/λ_1 при ограничениях на показатели эффективности: вероятность перераспределения ресурса по сигналу и вероятность блокировки сессии

В главе 4 исследованы модели приоритетного доступа эластичного трафика в условиях блокировок пути прямой видимости в сети миллиметрового диапазона. Приоритетными являются блокировки пути прямой видимости. Диапазон находится в двух состояниях: во время блокировки $u = 0$ – от момента ее возникновения до исчезновения – и между блокировками $u = 1$. В каждом таком состоянии объем ресурса фиксирован. Когда происходит блокировка, объем S ресурса изменяется – может полностью отказать с интенсивностью α и стать недоступным, или частично отказать – объем уменьшится. Потом объем ресурса восстанавливается с интенсивностью β . В качестве услуг рассмотрены загрузка веб-страниц, передача критически важных данных. Поскольку трафик является эластичным, любое событие, приводящее к изменению числа m обслуживаемых сессий, также становится приоритетным. Если число сессий возрастает, скорость всех сессий снижается, а если уменьшается – повышается.

Рассмотрены два сценария влияния блокировки на доступность ресурса. В первом случае ресурс отказывает полностью, во втором – частично. Передача эластичного трафика допускает задержки или их не происходит. При этом запросы на передачу трафика либо поступают независимо друг от друга в виде пуассоновского потока, либо поток коррелированный. Для обеспечения приоритета возникновения блокировок, применены два механизма доступа эластичного трафика: приостановка обслуживания и снижение скорости передачи. Для моделирования полного отказа ресурса использованы СМО с ненадежными приборами, а для частичного – СМО с двумя группами приборов – надежными и ненадежными. Для моделирования механизма приостановки обслуживания использована очередь длины R , а для коррелированного характера потока запросов на передачу трафика – МАР (Markov Arrival Process) поток.

В разделах 4.2 и 4.3 матрицы интенсивностей переходов представлены в блочно-трехдиагональном виде для пуассоновского и МАР потоков соответственно. Для расчета стационарного распределения предложены алгоритм в скалярном виде и матричный алгоритм. Проиллюстрирован вид

показателя приоритетного доступа – вероятности блокировки запроса на передачу эластичного трафика.

В разделах 4.4–4.6 для анализа показателя приоритетного доступа – среднего времени передачи эластичного трафика, учтен тот факт, что не всегда передача происходит непрерывно. Она приостанавливается, если ресурс полностью отказывает, а затем возобновляется при его восстановлении (раздел 4.4). Или замедляется, если ресурс частично отказывает, а затем ускоряется при его восстановлении (раздел 4.6). Поэтому для нахождения среднего времени передачи трафика введен поглощающий СП $Y(t)$, вложенный по моментам времени поступления запроса на передачу и до момента завершения его передачи.

Матрицы интенсивностей переходов для поглощающих СП представлены в блочно-трехдиагональном виде. Записан вид начального распределения вероятностей состояний поглощающих СП. Для расчета не только математического ожидания, но и других моментов времени передачи эластичного трафика записано соответствующее преобразование Лапласа-Стилтьеса (ПЛС). Получен матричный алгоритм расчета ожидаемого времени пребывания в состояниях СП до поглощения и моментов времени передачи трафика. Проиллюстрирован вид математического ожидания и дисперсии времени передачи эластичного трафика.

Лемма 3. Для модели с эластичным трафиком и полным отказом изменяемого объема ресурса, схемой с приостановкой обслуживания трафика и пуассоновским входящим потоком, если на пространстве $\mathcal{Y}$ состояний СП $Y(t)$ введен лексикографический порядок

$$y = (r, n, u) < \omega = y',$$

$$y = (r, n, u) < (r', n', u') = y' \Leftrightarrow \quad (30)$$

$$(u > u') \vee (u = u', r < r') \vee (u = u', r = r', n < n'), \quad y, y' \in \mathcal{Y},$$

$$\mathcal{Y} = \{(0, n, u): 1 \leq n \leq R, u = 0, 1\} \cup$$

$$\cup \{(r, n, u): M + r \leq n \leq R, u = 0, 1, 1 \leq r \leq R - M\} \cup \{\omega\}, \quad (31)$$

где $M = \lfloor C/b \rfloor$ максимальное число обслуживаемых сессий, r число ожидающих начала обслуживания сессий, n число сессий в системе – обслуживаемых и в очереди, ω поглощающее состояние, тогда матрица интенсивностей переходов СП $Y(t)$ представима в блочном виде

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{S} & \mathbf{s}^T \\ \mathbf{0} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{11} & \mathbf{S}_{10} \\ \mathbf{S}_{01} & \mathbf{S}_{00} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{s} = (\mathbf{s}_1, 0), \quad (32)$$

где блоки $\mathbf{S}_{11}$ и $\mathbf{S}_{00}$ также являются блочными матрицами

$$\mathbf{S}_{10} = \alpha \mathbf{I}, \quad \mathbf{S}_{01} = \beta \mathbf{I},$$

$$\mathbf{S}_{11} = \text{diag}(\mathbf{A}_0, \mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{A}_{R-M}) + \text{diag}^-(\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_{R-M}), \quad (33)$$

$$\mathbf{S}_{00} = \text{diag}(\mathbf{C}_0, \mathbf{C}_1, \dots, \mathbf{C}_{R-M})$$

с блоками, определяемыми по формулам

$$\mathbf{A}_0 = \text{diag}(-(\lambda + C\mu + \alpha), \dots, -(\lambda + C\mu + \alpha), -(C\mu + \alpha)) + \text{diag}^+(\lambda, \dots, \lambda) + \text{diag}^-\left(\frac{1}{2}C\mu, \frac{2}{3}C\mu, \dots, \frac{M-2}{M-1}C\mu, \frac{M-1}{M}C\mu, \underbrace{\frac{M-1}{M}C\mu, \dots, \frac{M-1}{M}C\mu}_{R-M+1}\right), \quad (34)$$

$$\dim \mathbf{A}_0 = R \times R,$$

$$\mathbf{A}_r = \text{diag}(-(\lambda + C\mu + \alpha), \dots, -(\lambda + C\mu + \alpha), -(C\mu + \alpha)) + \text{diag}^+(\lambda, \dots, \lambda), \quad (35)$$

$$\dim \mathbf{A}_r = (R - M - r + 1) \times (R - M - r + 1), \quad r = 1, \dots, R - M,$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & C\mu & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \ddots & \ddots \\ 0 & \dots & 0 & & C\mu & 0 \end{bmatrix}, \quad \dim \mathbf{B}_1 = (R - M) \times R, \quad (36)$$

$$\mathbf{B}_r = \begin{bmatrix} C\mu & 0 & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & C\mu & 0 \end{bmatrix}, \quad (37)$$

$$\dim \mathbf{B}_r = (R - M - r + 1) \times (R - M - r + 2), \quad r = 2, \dots, R - M,$$

$$\mathbf{C}_r = \text{diag}(-(\lambda + \beta), \dots, -(\lambda + \beta), -\beta) + \text{diag}^+(\lambda, \dots, \lambda), \quad \dim \mathbf{C}_0 = R \times R, \quad (38)$$

$$\dim \mathbf{C}_r = (R - M - r + 1) \times (R - M - r + 1), \quad r = 1, \dots, R - M,$$

$$\mathbf{s}_1 = \left(C\mu, \frac{1}{2}C\mu, \dots, \frac{1}{M-1}C\mu, \frac{1}{M}C\mu, \underbrace{\frac{1}{M}C\mu, \dots, \frac{1}{M}C\mu}_{R-M} \right), \quad \dim \mathbf{s}_1 = R. \quad (39)$$

Теорема 5. Для модели с эластичным трафиком и полным отказом изменяемого объема ресурса, схемой с приостановкой обслуживания трафика и пуассоновским входящим потоком, ожидаемое время пребывания в состояниях СП $\mathbf{Y}(t)$ до поглощения рассчитывается в матричном виде по формуле

$$\mathbf{t}_{01}^T = -(\mathbf{A}_0 + \alpha\beta\mathbf{X}_0)^{-1}(\mathbf{1}^T + \alpha\mathbf{X}_0\mathbf{1}^T), \quad (40)$$

$$\mathbf{t}_{r1}^T = -(\mathbf{A}_r + \alpha\beta\mathbf{X}_r)^{-1}(\mathbf{1}^T - \alpha\mathbf{X}_r\mathbf{1}^T + \mathbf{B}_r\mathbf{t}_{r-1}^T), \quad r = 1, \dots, R - M, \quad (41)$$

$$\mathbf{t}_{r0}^T = \mathbf{X}_r(\mathbf{1}^T + \beta\mathbf{t}_{r1}^T), \quad r = 0, \dots, R - M, \quad (42)$$

где матрица $\mathbf{X}_r$ имеет вид

$$\mathbf{X}_r = -\mathbf{C}_r^{-1}. \quad (43)$$

В главе 5 исследованы модели приоритетного доступа потокового трафика в условиях совместного использования лицензируемых радиочастот. Приоритетными являются запросы владельца на занятие радиочастот с интенсивностью α , что делает их недоступными для пользователей оператора. Однако, когда владелец завершает доступ к частотам с интенсивностью β , оператор снова может их использовать. Рассмотрены два сценария организации доступа к радиочастотам. В первом случае оператор имеет доступ только к диапазону C , который используется совместно с владельцем, в то время как во втором случае у него есть возможность использовать дополнительно

индивидуальный диапазон V . Рассмотрен также случай, когда оператор самостоятельно управляет доступом к совместно используемому диапазону. Если число сессий n трафика меньше порогового значения, доступ к диапазону выключен, а если больше – включен. Управление гистерезисное – первый порог N_1 отвечает за включение диапазона, а второй порог $N_2 < N_1$ – за его выключение.

Передача потокового трафика допускает задержки или их не происходит. Система с полным отказом ресурса рассмотрена для двух случаев – когда возможны отказы на периоде простоя системы в отсутствии сессий, и когда отказы отсутствуют. Для обеспечения приоритета запросов владельца совместно используемого диапазона применяются различные механизмы доступа потокового трафика: прерывание и приостановка обслуживания, снижение скорости передачи и мощности сигнала. Для моделирования полного отказа ресурса используется СМО с ненадежными приборами, а для частичного – СМО с двумя группами приборов – надежными и ненадежными. Для моделирования механизма приостановки обслуживания используется очередь длины $R > C$, а для снижения мощности сигнала – РеСМО с двумя типами ресурсов.

В разделах 5.2 и 5.4 матрицы интенсивностей переходов представлены в блочно-трехдиагональном виде и стационарное распределение рассчитывается с помощью матричного алгоритма для систем с полным и частичным отказом ресурса соответственно. В разделе 5.2 предложен алгоритм расчета распределения вероятностей числа ожидающих начала обслуживания сессий трафика и среднего числа приостановленных сессий. В качестве исходных данных для алгоритма используется стационарное распределение $\pi(m, k)$, где m число обслуживаемых сессий трафика на ненадежном ресурсе, k суммарное число сессий в очереди, как приостановленных, так и ожидающих начала обслуживания. Алгоритм позволяет в скалярном виде рассчитать характеристику приоритетного доступа – среднее число приостановленных сессий – на базе двухмерного СП с состояниями (m, k) вместо того, чтобы использовать трехмерный СП.

Теорема 6. Для модели с потоковым трафиком и полным отказом изменяемого объема ресурса, схемой с приостановкой обслуживания трафика без отказов ресурса на периоде простоя системы, распределение вероятностей числа ожидающих начала обслуживания сессий трафика рассчитывается по формуле

$$p_r = \sum_{(m,k) \in \mathcal{X}} A_r(m, k) \cdot \pi(m, k), \quad r = 0, \dots, R - C, \quad (44)$$

$$\mathcal{X} = \{(0, k): 1 \leq k \leq R\} \cup \{(m, 0): 0 \leq m \leq C\} \cup \{(C, k): 1 \leq k \leq R - C\}, \quad (45)$$

где вероятности $A_r(m, k)$ того, что число ожидающих начала обслуживания сессий равно r при условии того, что система находится в состоянии (m, k) , вычисляются по формулам

$$A_r(0, k) = B_0(k - r) \cdot \prod_{i=k-r+1}^k B_1(i), \quad k = 2, \dots, C, \quad r = 0, \dots, k - 1, \quad (46)$$

$$A_{k-C}(0, k) = \sum_{i=0}^{k-C} B_0(C+i) \cdot \prod_{i=C+i+1}^k B_1(i), \quad k = C+1, \dots, R-C, \quad (47)$$

$$A_r(0, k) = B_0(k-r) \cdot \prod_{i=k-r+1}^k B_1(i), \quad k = C+1, \dots, R-C, \quad r = k-C+1, \dots, k-1, \quad (48)$$

а вероятности $B_0(n)$ перехода в состояние $(0, n)$ из-за отказа ресурса и $B_1(n)$ перехода в состояние $(0, n)$ из-за поступления запроса на передачу трафика вычисляются соответственно по формулам

$$B_0(1) = 0, \quad (49)$$

$$B_0(n) = \frac{\alpha\pi(n, 0)}{\alpha\pi(n, 0) + \lambda\pi(0, n-1)}, \quad n = 1, \dots, C, \quad (50)$$

$$B_0(n) = \frac{\alpha\pi(C, n-C)}{\alpha\pi(C, n-C) + \lambda\pi(0, n-1)}, \quad n = C+1, \dots, R, \quad (51)$$

$$B_1(1) = 1, \quad (52)$$

$$B_1(n) = \frac{\lambda\pi(0, n-1)}{\alpha\pi(n, 0) + \lambda\pi(0, n-1)}, \quad n = 2, \dots, C, \quad (53)$$

$$B_1(n) = \frac{\lambda\pi(0, n-1)}{\alpha\pi(C, n-C) + \lambda\pi(0, n-1)}, \quad n = C+1, \dots, R. \quad (54)$$

Следовательно, среднее число приостановленных сессий потокового трафика рассчитывается по формуле

$$\bar{q} = \sum_{(m,k) \in \mathcal{X}} k \cdot \pi(m, k) - \sum_{r=0}^{R-C} r \cdot p_r. \quad (55)$$

Проиллюстрируем его поведение на примере сценария радиотелеметрии с самолетами. Система совместного доступа к лицензируемым радиочастотам LSA (licensed shared access) позволяет мобильным операторам временно использовать частоты радиотелеметрии, когда они не заняты авиацией. Это расширяет пропускную способность сети в районах с высокой нагрузкой вокруг аэропортов. При этом приоритет всегда остается за авиацией: при необходимости радиотелеметрии оператор должен освободить LSA-диапазон. На рисунке 4 представлены графики среднего числа приостановленных сессий потокового трафика в зависимости от предложенной нагрузки для разного среднего времени доступности диапазона радиочастот. С увеличением нагрузки растет и среднее число приостановленных сессий потокового трафика. Это происходит из-за ограниченной пропускной способности системы и частой потребности использования частот для радиотелеметрии. Чем меньше среднее время доступности диапазона для оператора, тем выше число приостановленных сессий.

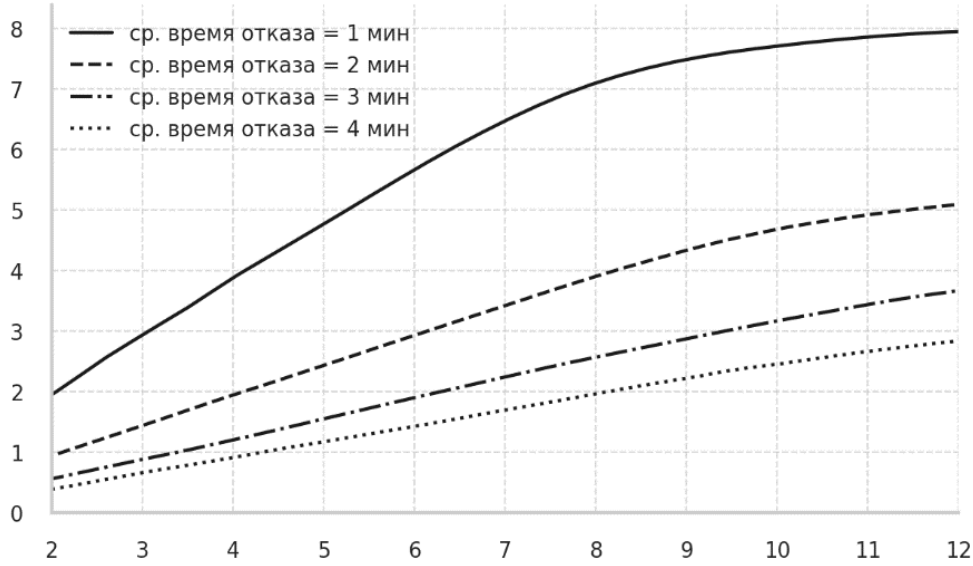


Рисунок 4 – Среднее число приостановленных сессий потокового трафика от предложенной нагрузки (Эрл) для разного среднего времени доступности диапазона радиочастот (мин)

В разделе 5.3 проведен анализ длительности периода занятости, который начинается в момент, когда поступивший запрос на передачу трафика застает систему в свободном состоянии, а заканчивается в момент, когда последняя из сессий трафика завершается. Получены матричные алгоритмы расчета ПЛС времени первого достижения пустого состояния СП и ПЛС длительности периода занятости. Проиллюстрирован вид среднего времени, в течение которого ресурс находится в состоянии отказа в цикле регенерации, и среднего времени, в течение которого ресурс доступен и полностью занят.

Лемма 4. Для модели с потоковым трафиком и полным отказом изменяемого объема ресурса, схемой с приостановкой обслуживания трафика и отказами ресурса на периоде простоя системы, ПЛС времени первого достижения пустого состояния СП $X(t)$ рассчитывается в матричном виде по рекуррентным формулам

$$\phi_0^T(s) = e = (1, 1), \quad (56)$$

$$\phi_n^T(s) = X_n(s) \phi_{n+1}^T(s) + Y_n(s), \quad n = 1, \dots, R-1, \quad (57)$$

$$\phi_R^T(s) = Y_R(s), \quad (58)$$

где матрицы $X_n(s)$ и $Y_n(s)$ вычисляются по рекуррентным соотношениям

$$X_1(s) = -(Q_{01} - sI)^{-1} Q_{11}, \quad (59)$$

$$X_n(s) = -[Q_{0n} - sI + Q_{2n} X_{n-1}(s)]^{-1} Q_{11}, \quad n = 2, \dots, C, \quad (60)$$

$$X_n(s) = -[Q_{0C} - sI + Q_{2C} X_{n-1}(s)]^{-1} Q_{11}, \quad n = C+1, \dots, R-1, \quad (61)$$

$$Y_1(s) = -(Q_{01} - sI)^{-1} Q_{21} \mathbf{1}^T, \quad (62)$$

$$Y_n(s) = -[Q_{0n} - sI + Q_{2n} X_{n-1}(s)]^{-1} Q_{2n} Y_{n-1}(s), \quad n = 2, \dots, C, \quad (63)$$

$$Y_n(s) = -[Q_{0C} - sI + Q_{2C} X_{n-1}(s)]^{-1} Q_{2C} Y_{n-1}(s), \quad n = C+1, \dots, R-1, \quad (64)$$

$$Y_R(s) = -[Q_{0,C+1} - sI + Q_{2C} X_{R-1}(s)]^{-1} Q_{2C} Y_{R-1}(s). \quad (65)$$

Теорема 7. Для модели с потоковым трафиком и полным отказом изменяемого объема ресурса, схемой с приостановкой обслуживания трафика и отказами ресурса на периоде простоя системы, ПЛС времени первого достижения пустого состояния рассчитывается в матричном виде по формулам

$$\boldsymbol{\varphi}_0^T(s) = \mathbf{e}, \quad (66)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_n^T(s) = \sum_{i=n}^R \prod_{j=n}^{i-1} \mathbf{X}_j(s) \mathbf{Y}_i(s), \quad n = 1, \dots, R-1, \quad (67)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_R^T(s) = \mathbf{Y}_R(s), \quad (68)$$

где матрицы $\mathbf{X}_n(s)$ и $\mathbf{Y}_n(s)$ вычисляются по рекуррентным соотношениям леммы 4.

Следовательно, ПЛС длительности периода занятости рассчитывается по формуле

$$\varphi(s) = \frac{\pi_0}{\pi_0 \mathbf{1}^T} \boldsymbol{\varphi}_1^T(s), \quad (69)$$

где время $\boldsymbol{\varphi}_1^T(s)$ первого достижения пустого состояния из состояния, когда в системе 1 сессия потокового трафика вычисляется в матричном виде по формуле

$$\boldsymbol{\varphi}_1^T(s) = \sum_{i=1}^R \prod_{j=1}^{i-1} \mathbf{X}_j(s) \mathbf{Y}_i(s), \quad (70)$$

а матрицы $\mathbf{X}_n(s)$ и $\mathbf{Y}_n(s)$ вычисляются по рекуррентным соотношениям леммы 4.

В разделе 5.5 поставлена задача выбора порогов гистерезисного доступа как политики управления. Получен вид средней стоимости использования ненадежного ресурса для произвольной фиксированной политики и сформулирована задача оптимизации. Для поиска оптимальной политики использован подход с применением машинного обучения – применен генетический алгоритм. Политика – тройка чисел: объем ненадежного ресурса и два порога гистерезисного доступа – представлены в виде битовой строки, состоящей из трех соответствующих бинарных сегментов. Проиллюстрирован вид функции стоимости использования ненадежного ресурса.

Теорема 8. Для модели с потоковым трафиком и частичным отказом изменяемого объема ресурса, схемой с приостановкой обслуживания трафика и гистерезисным доступом, стационарное распределение СП $\mathbf{X}(t)$ рассчитывается в матричном виде по рекуррентным формулам

$$\pi(n, 0) = \frac{\lambda^n}{\mu^n} \frac{1}{n!} \pi(0, 0), \quad n = 1, \dots, \min(N_2, V), \quad (71)$$

$$\pi(n, 0) = \frac{\lambda^n}{\mu^n} \frac{1}{V! V^{n-V}} \pi(0, 0), \quad n = V + 1, \dots, N_2, \quad N_2 > V, \quad (72)$$

$$\pi(n, 0) = \frac{A(N_1 - n - 1)}{A(N_1 - N_2 - 1)} \cdot \pi(N_2, 0), \quad n = N_2 + 1, \dots, N_1 - 1, \quad (73)$$

$$\pi_n = \pi(N_1 - 1, 0) \sum_{j=N_1}^N \mathbf{Y}_j \prod_{i=0}^{j-n-1} \mathbf{X}_{j-i-1}, \quad n = N_2 + 1, \dots, N_1 - 1, \quad N_1 > N_2 + 1, \quad (74)$$

$$\pi_n = \pi(N_1 - 1, 0) \sum_{j=n}^N \mathbf{Y}_j \prod_{i=0}^{j-n-1} \mathbf{X}_{j-i-1}, \quad n = N_1, \dots, N, \quad (75)$$

$$\pi_n = \pi_N \mathbf{R}^{n-N}, \quad n = N + 1, N + 2, \dots \quad (76)$$

где коэффициенты $A(n)$, матрицы $\mathbf{X}_n$ и $\mathbf{Y}_n$ вычисляются по рекуррентным соотношениям

$$A(0) = 0, \quad A(n) = 1 + \frac{\min(N_1 - n, V) \mu}{\lambda} A(n-1), \quad n = 1, \dots, N_1 - N_2 - 1, \quad (77)$$

$$\mathbf{X}_{N_2+1} = -\mathbf{A}_{2, N_2+2} \mathbf{A}_{0, N_2+1}^{-1}, \quad (78)$$

$$\mathbf{X}_n = -\mathbf{A}_{2, n+1} (\lambda \mathbf{X}_{n-1} + \mathbf{A}_{0n})^{-1}, \quad n = N_2 + 2, \dots, N - 1, \quad (79)$$

$$\mathbf{Y}_{N_1} = -\lambda (p, 1-p) (\lambda \mathbf{X}_{N_1-1} + \mathbf{A}_{0N_1})^{-1}, \quad N_1 > N_2 + 1, \quad (80)$$

$$\mathbf{Y}_{N_1} = -\lambda (p, 1-p) \mathbf{A}_{0N_1}^{-1}, \quad N_1 = N_2 + 1, \quad (81)$$

$$\mathbf{Y}_n = -\lambda \mathbf{Y}_{n-1} (\lambda \mathbf{X}_{n-1} + \mathbf{A}_{0n})^{-1}, \quad n = N_1 + 1, \dots, N - 1, \quad (82)$$

$$\mathbf{Y}_{N-N_2} = -\lambda \mathbf{Y}_{N-1-N_2} (\lambda \mathbf{X}_{N-1-N_2} + \mathbf{A}_{0, N+1} + \mathbf{R} \mathbf{A}_{2, N+1})^{-1}, \quad (83)$$

где p вероятность того, что после включения ненадежного ресурса он будет доступен, а матрица $\mathbf{R}$ является минимальным неотрицательным решением квадратичного матричного уравнения

$$\mathbf{R}^2 \mathbf{A}_{2N} + \mathbf{R} \mathbf{A}_{0N} + \lambda \mathbf{I} = \mathbf{0} \quad (84)$$

и $N = \max(N_1 + 1, V + C)$.

В разделе 5.6 для ресурсных систем найдены вероятности занятия ресурса и условные вероятности выделения ресурса. Приведены показатели эффективности приоритетного доступа: вероятности прерывания обслуживания и средней скорости передачи потокового трафика.

Заключение содержит основные научные результаты работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты работы состоят в следующем.

1. Разработан комплекс моделей приоритетного доступа эластичного и потокового трафика в беспроводных сетях с применением механизмов прерывания и приостановки сессии, снижения скорости передачи и мощности сигнала. Модели применимы для анализа сценариев беспроводных сетей с несколькими классами пользователей, ненадежными и совместно используемыми ресурсами. Показателями эффективности приоритетного доступа являются характеристики случайных величин прерывания сессии, скорости передачи, объема используемого ресурса. Для классификации моделей комплекса предложена модификация обозначений Башарина – Кендалла.

2. Разработаны модели приоритетного доступа потокового трафика для услуг беспроводной сети. Для узкополосной сверхнадежной передачи с малой задержкой и широкополосной связи разработан матричный алгоритм расчета стационарного распределения для системы с двумя орбитами. Получены формулы для расчета вероятности прерывания и средней скорости широкополосного трафика для системы со случайным требованием к объему надежного ресурса, дискриминаторным разделением слота времени и снижением мощности сигнала. Для одноадресного видео по требованию и многоадресной видеоконференции предложен рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения. Формализована задача максимизации средней скорости видеоконференции по значениям уровней скорости и при ограничениях на вероятность блокировки и вероятность прерывания сессии.
3. Разработаны модели приоритетного доступа эластичного трафика с требованием к минимальной скорости передачи. Для обслуживания трафика в нелицензируемых радиочастотах построена модель системы массового обслуживания, допускающая мультипликативное распределение вероятностей. Для нарезки радиоресурсов предложена модель управляемой системы массового обслуживания с перераспределением ресурса по сигналам по критерию максимума взвешенной суммы коэффициентов соответствия равному делению ресурса, результативности сигналов и использования ресурса. Формализована задача максимизации взвешенной суммы коэффициентов по параметру потока сигналов, управляющего нарезкой.
4. Разработаны модели обслуживания критически важных данных в миллиметровом диапазоне в виде систем с эластичным трафиком и ненадежным ресурсом. Время недоступности миллиметрового диапазона по причине его блокировки препятствием моделируется временем отказа ненадежных приборов. При отказе происходит приостановка или снижение скорости обслуживания трафика, а изменяемая активность пользователей моделируется марковским потоком МАР. Получены матричные алгоритмы расчета стационарного распределения и символьного вычисления преобразования Лапласа-Стилтьеса и моментов времени передачи эластичного трафика по вложенной цепи Маркова.
5. Разработаны модели совместного использования радиочастот с приоритетным доступом и случайным требованием потокового трафика к объему ненадежного ресурса. Получен рекуррентный алгоритм расчета среднего числа приостановленных сессий. Разработан матричный алгоритм символьного вычисления преобразования Лапласа-Стилтьеса периода занятости системы. Предложена модель управляемой системы массового обслуживания с гистерезисным занятием ненадежных приборов по критерию минимума средней стоимости использования ресурса и обслуживания сессий. Получен алгоритм расчета вероятности прерывания и средней скорости передачи трафика для двухресурсной системы массового обслуживания с зависимым занятием ресурса и снижением мощности сигнала.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных базах индексации и цитирования (МБЦ) Web of Science и Scopus

1. Kushchazli A., Leonteva K., **Kochetkova I.**, Khakimov A. Evaluating QoS in dynamic virtual machine migration: A multi-class queuing model for edge-cloud systems // Journal of Sensor and Actuator Networks. – 2025. – Vol. 14, No. 3. – Art. No. 47.
2. Kushchazli A., Safargalieva A., **Kochetkova I.**, Gorshenin A. Queuing model with customer class movement across server groups for analyzing virtual machine migration in cloud computing // Mathematics. – 2024. – Vol. 12, No. 3. – Art. No. 468.
3. Ghebrial I., Leonteva K., **Kochetkova I.**, Shorgin S. Markov decision process and artificial neural network for resource capacity planning in 5G network slicing // Communications in Computer and Information Science. – 2024. – Vol. 2163. – P. 33-47.
4. **Kochetkova I.**, Leonteva K., Ghebrial I., Vlaskina A., Burtseva S., Kushchazli A., Samouylov K. Controllable queuing system with elastic traffic and signals for resource capacity planning in 5G network slicing // Future Internet. – 2024. – Vol. 16, No. 1. – Art. No. 18.
5. Makeeva E., **Kochetkova I.**, Alkanhel R. Retrial queueing system for analyzing impact of priority ultra-reliable low-latency communication transmission on enhanced mobile broadband quality of service degradation in 5G networks // Mathematics. – 2023. – Vol. 11, No. 18. – Art. No. 3925.
6. **Kochetkova I.**, Kushchazli A., Burtseva S., Gorshenin A. Short-term mobile network traffic forecasting using seasonal ARIMA and Holt-Winters models // Future Internet. – 2023. – Vol. 15, No. 9. – Art. No. 290.
7. **Kochetkova I.**, Makeeva E., Ageeva A., Gorshenin A. Model for analyzing impact of path loss on eMBB bit rate degradation under priority URLLC transmission in 5G network // Lecture Notes in Computer Science. – 2022. – Vol. 13766. – P. 176-189.
8. Kushchazli A., Ageeva A., **Kochetkova I.**, Kharin P., Chursin A., Shorgin S. Model of radio admission control for URLLC and adaptive bit rate eMBB in 5G network // CEUR Workshop Proceedings. – 2021. – Vol. 2946. – P. 74-84.
9. **Kochetkova I.**, Vlaskina A., Burtseva S., Savich V., Hosek J. Analyzing the effectiveness of dynamic network slicing procedure in 5G network by queuing and simulation models // Lecture Notes in Computer Science. – 2020. – Vol. 12525. – P. 71-85.
10. Efrosinin D., **Gudkova I.**, Stepanova N. Performance analysis and optimal control for queueing system with a reserve unreliable server pool // Communications in Computer and Information Science. – 2019. – Vol. 1109. – P. 109-120.
11. Makeeva E., Polyakov N., Kharin P., **Gudkova I.** Probability model for performance analysis of joint URLLC and eMBB transmission in 5G networks // Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – Vol. 11660. – P. 635-648.
12. Markova E., Moltchanov D., **Gudkova I.**, Samouylov K., Koucheryavy Y. Performance assessment of QoS-aware LTE sessions offloading onto LAA/WiFi systems // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 36300-36311, Art. No. 8672559.
13. Markova E., Moltchanov D., Sinitsyna A., Ivanova D., Filipova V., **Gudkova I.**, Samouylov K. Analytical models for schedule-based license assisted access (LAA) LTE systems // Lecture Notes in Computer Science. – 2018. – Vol. 11118. – P. 210-223.
14. Markova E., **Gudkova I.**, Ometov A., Dzantiev I., Andreev S., Koucheryavy Y., Samouylov K. Flexible spectrum management in a smart city within licensed shared access framework // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 22252-22261, Art. No. 8055552.
15. Ometov A., Sopin E., **Gudkova I.**, Andreev S., Gaidamaka Y.V., Koucheryavy Y. Modeling unreliable operation of mmWave-based data sessions in mission-critical PPDR services // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 20536-20544, Art. No. 8055435.
16. Markova E., Dzantiev I., **Gudkova I.**, Shorgin S. Analyzing impact of path loss models on probability characteristics of wireless network with licensed shared access framework // Proc. 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – 2017. – P. 20-25.

17. Markova E.V., Poluektov D.S., Ostrikova D.U., **Gudkova I.A.** On comparative analysis of shared access scheme models with service interruption in 3GPP LTE network with LSA framework // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 2064. – P. 112-120.
18. Golskaia A.A., Markova E.V., Dzantiev I.L., **Gudkova I.A.** Analysis of performance measures for scheme model with limit power policy within LSA framework // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1995. – P. 42-52.
19. Markova E., Poluektov D., Ostrikova D., **Gudkova I.**, Dzantiev I., Samouylov K., Shorgin V. Analysis of admission control schemes models for wireless network under licensed shared access framework // Lecture Notes in Computer Science. – 2017. – Vol. 10531. – P. 536-549.
20. Ivanova D., Karnauhova E., Markova E., **Gudkova I.** Analyzing of licensed shared access scheme model with service bit rate degradation in 3GPP network // Communications in Computer and Information Science. – 2017. – Vol. 800. – P. 231-242.
21. Mokrov E., Sopin E., Markova E., Poluektov D., **Gudkova I.**, Masek P., Hosek J. Modeling and response time analysis for web browsing under interruptions in LTE network // Proc. 31st European Conference on Modelling and Simulation (ECMS), 2017. – P. 706-712.
22. **Gudkova I.**, Markova E., Masek P., Andreev S., Hosek J., Yarkina N., Samouylov K., Koucheryavy Y. Modeling the utilization of a multi-tenant band in 3GPP LTE system with licensed shared access // Proc. 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – 2016. – P. 119-123, Art. No. 7765343.
23. Borodakiy V.Y., Samouylov K.E., **Gudkova I.A.**, Markova E.V. Analyzing mean bit rate of multicast video conference in LTE network with adaptive radio admission control scheme // Journal of Mathematical Sciences (United States). – 2016. – Vol. 218, No. 3. – P. 257-268.
24. Samouylov K., **Gudkova I.**, Markova E. Formalizing set of multiservice models for analyzing pre-emption mechanisms in wireless 3GPP networks // Communications in Computer and Information Science. – 2016. – Vol. 601. – P. 61-71.
25. **Gudkova I.**, Samouylov K., Ostrikova D., Mokrov E., Ponomarenko-Timofeev A., Andreev S., Koucheryavy Y. Service failure and interruption probability analysis for licensed shared access regulatory framework // Proc. 7th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – 2015. – P. 123-131, Art. No. 7382416.
26. Samouylov K., Sopin E., **Gudkova I.** Sojourn time analysis for processor sharing loss queuing system with service interruptions and MAP arrivals // Communications in Computer and Information Science. – 2016. – Vol. 678. – P. 406-417.
27. Samouylov K., **Gudkova I.**, Markova E., Yarkina N. Queuing model with unreliable servers for limit power policy within licensed shared access framework // Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9870. – P. 404-413.
28. Efrosinin D., Samouylov K., **Gudkova I.** Busy period analysis of a queueing system with breakdowns and its application to wireless network under licensed shared access regime // Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9870. – P. 426-439.
29. Samouylov K., Naumov V., Sopin E., **Gudkova I.**, Shorgin S. Sojourn time analysis for processor sharing loss system with unreliable server // Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9845. – P. 284-297.
30. Borodakiy V.Y., Samouylov K.E., **Gudkova I.A.**, Ostrikova D.Y., Ponomarenko-Timofeev A.A., Turlikov A.M., Andreev S.D. Modeling unreliable LSA operation in 3GPP LTE cellular networks // Proc. 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – 2014. – P. 390-396, Art. No. 7002133.
31. Borodakiy V.Y., **Gudkova I.A.**, Markova E.V., Samouylov K.E. Modelling and performance analysis of pre-emption based radio admission control scheme for video conferencing over LTE // Proc. 6th ITU Kaleidoscope Academic Conference (K). – 2014. – P. 53-59, Art. No. 6858480.

Работы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в наукометрической базе данных RSCI

32. Макеева Е.Д., Кочеткова И.А., Шоргин С.Я. Вероятностная модель затухания мощности сигнала в сценариях 3GPP TR 38.901 развертывания сети 5G // Информатика и ее применения. – 2024. – Т. 18, № 2. – С. 25-31.
33. Кочеткова И.А., Власкина А.С., Эсенг Манге П.Л.Э., Шоргин В.С. Задача разделения ресурса беспроводной сети по задержке передачи эластичного трафика // Системы и средства информатики. – 2024. – Т. 34, № 1. – С. 23-32.
34. Макеева Е.Д., Кочеткова И.А., Шоргин В.С. Модель для выбора уровней скорости широкополосного трафика eMBB в условиях приоритетной передачи трафика URLLC в сети 5G // Системы и средства информатики. – 2023. – Т. 33, № 4. – С. 60-68.
35. Власкина А.С., Бурцева С.А., Кочеткова И.А., Шоргин С.Я. Управляемая система массового обслуживания с эластичным трафиком и сигналами для анализа нарезки ресурсов в сети радиодоступа // Информатика и ее применения. – 2022. – Т. 16, № 3. – С. 90-96.
36. Кочеткова И.А., Власкина А.С., Ву Н.Н., Шоргин В.С. Система массового обслуживания с управляемым по сигналам перераспределением приборов для анализа нарезки ресурсов сети 5G // Информатика и ее применения. – 2021. – Т. 15, № 3. – С. 91-97.
37. Кочеткова И.А., Куцазли А.И., Харин П.А., Шоргин С.Я. Модель схемы приоритетного доступа трафика URLLC и eMBB в сети пятого поколения в виде ресурсной системы массового обслуживания // Информатика и ее применения. – 2021. – Т. 15, № 4. – С. 87-92.
38. Кочеткова И.А., Куцазли А.И., Харин П.А., Шоргин С.Я. Модель для анализа приоритетного доступа трафика URLLC при прерывании обслуживания и снижении скорости передачи сессий eMBB в сети 5G // Системы и средства информатики. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 123-134.
39. Власкина А.С., Поляков Н.А., Гудкова И.А., Гайдамака Ю.В. Анализ вероятностно-временных характеристик обслуживания эластичного трафика с минимальной скоростью в сегменте беспроводной сети с нарезкой радиоресурсов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 378-387.
40. Харин П.А., Макеева Е.Д., Кочеткова И.А., Ефросинин Д.В., Шоргин С.Я. Система массового обслуживания с орбитами для анализа совместного обслуживания трафика с малыми задержками URLLC и широкополосного доступа eMBB в беспроводных сетях пятого поколения // Информатика и ее применения. – 2020. – Т. 14, № 4. – С. 17-24.
41. Гудкова И.А., Шоргин С.Я. Вероятностная модель совместного использования ресурсов беспроводной сети с адаптивным управлением мощностью // Информатика и ее применения. – 2017. – Т. 11, № 3. – С. 90-98.
42. Самуйлов К.Е., Гудкова И.А., Маркова Е.В. К разработке исходных данных для сценария приоритетного управления доступом в мультисервисной сети LTE // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т. 9, № 10. – С. 22-27.
43. Бородакий В.Ю., Гудкова И.А., Маркова Е.В. Рекуррентный алгоритм для расчета характеристик модели приоритетного управления доступом в сети LTE // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – Т. 7, № 11. – С. 45-49.

Работа в рецензируемом научном издании, рекомендованном перечнем Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки РФ (Перечень ВАК РФ)

44. Гудкова И.А., Маркова Е.В. Рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения вероятностей состояний модели с прерыванием одноадресных соединений трафиком мультивещания // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика, информатика, физика. – 2015. – № 3. – С. 10-17.

Зарегистрированные свидетельства на программу для электронных вычислительных машин

45. Гебриал И.Е.З., Леонтьева К.А., **Кочеткова И.А.** Расчет оптимальной политики управляемого контроллером перераспределения ресурса между двумя виртуальными операторами с использованием нейронной сети // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662703 Российская Федерация : № 2024661796 : заявл. 27.05.2024 : опубл. 30.05.2024.
46. Леонтьева К.А., Гебриал И.Е.З., Бурдина К.П., Бурцева С.А., Власкина А.С., **Кочеткова И.А.** Расчет стационарного распределения вероятностей состояний модели нарезки радиоресурсов для заданной политики перераспределения ресурса между двумя виртуальными операторами // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662074 Российская Федерация : № 2023661391 : заявл. 02.06.2023 : опубл. 06.06.2023.
47. Агеева А.С., Макеева Е.Д., **Кочеткова И.А.** Расчет характеристик модели приоритетного доступа трафика URLLC с адаптивным изменением скорости трафика eMBB в условиях затухания сигнала сети 5G // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663827 Российская Федерация : № 2023662790 : заявл. 21.06.2023 : опубл. 28.06.2023.
48. Власкина А.С., **Кочеткова И.А.** Расчет оптимальной политики управляемого по внешним событиям динамического разделения ресурса для обслуживания двух потоков заявок на выполнение работы заданного объема // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023667476 Российская Федерация : № 2023666719 : заявл. 08.08.2023 : опубл. 15.08.2023.
49. Филиппова В.С., Хусайнова Ф.Д., Власкина А.С., **Кочеткова И.А.**, Бурцева С.А. Расчет показателей эффективности модели управления нарезкой радиоресурсов беспроводной сети между двумя виртуальными операторами по сигналам контроллера // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660727 Российская Федерация : № 2022619563 : заявл. 27.05.2022 : опубл. 08.06.2022.
50. Агеева А.С., Куцазли А.И., Харин П.А., **Кочеткова И.А.** Расчет вероятностно-временных характеристик для модели приоритетного доступа трафика URLLC с адаптивным изменением скорости трафика eMBB в сети 5G // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661640 Российская Федерация : № 2021660823 : заявл. 08.07.2021 : опубл. 14.07.2021.
51. Ву Н.Н., Власкина А.С., **Кочеткова И.А.**, Бурцева С.А. Расчет показателей эффективности модели динамической нарезки между двумя сегментами радиоресурсов с управлением по внешнему событию // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661716 Российская Федерация : № 2021660847 : заявл. 08.07.2021 : опубл. 14.07.2021.

Монографии

52. **Кочеткова И.А.**, Самуйлов К.Е. Мультисервисные системы с приоритетным обслуживанием трафика // М.: Техносфера, 2025. – 160 с.
53. Гайдамака Ю.В., Сопин Э.С., **Гудкова И.А.**, Андреев С.Д., Самуйлов К.Е., Шоргин С.Я. Модели и методы анализа и расчета показателей эффективности беспроводных гетерогенных сетей. – М.: ФИЦ ИУ РАН, 2018. – 71 с.

Учебно-методическое пособие

54. Самуйлов К.Е., Абаев П.О., Гайдамака Ю.В., **Гудкова И.А.**, Королькова А.В., Кулябов Д.С., Щукина О.Н. Мультисервисные сети связи. – М.: РУДН, 2013. – 363 с.

Труды конференции

55. **Кочеткова И.А.**, Самуйлов К.Е. Классификация моделей схем приоритетного доступа в беспроводных сетях // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: сборник научных трудов. – М.: ИПУ РАН, 2024. – С. 2350-2354.

Кочеткова Ирина Андреевна (Российская Федерация)

Модели для анализа эффективности приоритетного доступа в беспроводных сетях с эластичным и потоковым трафиком

В диссертации разработаны модели математической теории телетрафика, позволившие выявить закономерности приоритетного доступа в беспроводных сетях для сценариев сверхнадежной передачи данных с малой задержкой и критически важных данных, в миллиметровом диапазоне и нелицензируемом диапазоне радиочастот, при использовании технологии нарезки сети и системы совместного использования радиочастот. Предложены алгоритмы для анализа и расчета показателей эффективности, а также настройки параметров приоритетного доступа нескольких классов эластичного и потокового трафика к постоянному и изменяемому объему ресурса с применением механизмов прерывания и приостановки сессии, снижения скорости передачи и мощности сигнала. Доказаны утверждения, позволяющие вычислять стационарные распределения вероятностей состояний моделей систем приоритетного доступа в беспроводных сетях, их показатели эффективности, а также осуществлять выбор политик управления работой этих систем. Введена модернизация существующей классификации моделей математической теории телетрафика в обозначениях Башарина – Кендалла, отражающая в виде матрицы приоритетов особенности приоритетного доступа в современных беспроводных сетях – приоритет для каждой пары классов заявок, возможность снижать скорость, учитывать структуру и разные типы ресурса, влияние на систему внешних событий.

Kochetkova Irina Andreevna (Russia)

Models for performance analysis of priority admission control in wireless networks with elastic and streaming traffic

This dissertation develops mathematical teletraffic theory models to identify patterns of priority admission control in wireless networks. These models address scenarios involving ultra-reliable low-latency data transmission, critical data handling, millimeter-wave bands, and unlicensed frequency bands, leveraging network slicing and radio-frequency spectrum-sharing systems. The study proposes algorithms to analyze and calculate performance metrics, as well as to configure priority admission control parameters for multiple classes of elastic and streaming traffic. These algorithms adapt to fixed and variable resource capacities by employing mechanisms such as session interruption/suspension, transmission rate reduction, and signal power adjustment. The work establishes theoretical propositions for computing stationary probability distributions of system states in priority admission control models, evaluating their performance metrics, and selecting optimal management policies. Additionally, it modernizes the existing Basharin–Kendall notation-based classification of teletraffic theory models by introducing a priority admission control matrix. This matrix captures the nuances of priority admission control in modern wireless networks, including priority definitions for each pair of traffic classes, rate reduction capabilities, resource structure and heterogeneity (e.g., fixed vs. dynamic resources), the impact of external events on system behavior. The refined framework enhances the analysis of priority admission control strategies in next-generation wireless systems.