

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Орлова Юрия Николаевича

на диссертационную работу Сопина Эдуарда Сергеевича на тему «Модели ресурсных систем массового обслуживания и их применения к анализу и расчету показателей эффективности беспроводных сетей», представленную к защите в ПДС 0200.006 на базе Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.3 — Теоретическая информатика, кибернетика

Актуальность темы

Диссертационная работа Сопина Эдуарда Сергеевича «Модели ресурсных систем массового обслуживания и их применения к анализу и расчету показателей эффективности беспроводных сетей» направлена на создание теоретических основ для анализа и расчета показателей эффективности сетей радиодоступа в современных и перспективных системах мобильной связи.

В современных сотовых системах, использующих диапазоны миллиметровых и терагерцовых частот, требования к частотно-временным ресурсам для сессий передачи данных могут сильно меняться из-за множества факторов, в том числе из-за случайного местоположения пользователей и колебаний качества радиоканала, что делает требуемый объем ресурсов случайной величиной. Из-за мобильности пользователей требования сессий к ресурсу сети могут меняться в десятки раз в течение очень короткого периода времени. Помимо этого, пользовательские сессии передачи данных могут прерываться из-за блокировки пути прямого распространения сигнала между пользователем и базовой станцией.

В теории массового обслуживания и теории телетрафика известны ставшие классическими модели, которые позволяют моделировать отдельные из перечисленных эффектов, как, например, системы массового обслуживания с отрицательными заявками или мультисервисные системы. Однако они не в полной мере учитывают специфику выделения ресурсов в современных беспроводных сетях, что ограничивает возможности их применения. Модели ресурсных систем массового обслуживания (РеСМО) позволяют разработать комплексную методику анализа сетей радиодоступа, учитывающих современные сценарии использования и особенности технологий. Работа Сопина Э.С. направлена на развитие теории РеСМО и прикладные аспекты ее применения, что подчеркивает ее актуальность.

Тема диссертационного исследования имеет высокую значимость и актуальность, отражает современные научно-технические задачи и полностью соответствует профилю специальности 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика (по физико-математическим наукам).

Содержание диссертации

Диссертационная работа Сопина Э.С. включает введение, пять глав, заключение и список литературы из 246 источников.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, а также научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит аналитический обзор основных результатов в области систем массового обслуживания со случайными требованиями к ресурсу. Сравниваются два подхода к построению случайного процесса, описывающего функционирование ресурсной системы. Кроме того, предложен метод описания особенностей технологии радиодоступа в виде кусочно-постоянной функции распределения требований к ресурсу РеСМО.

Вторая и третья главы посвящены методам анализа различных РеСМО и алгоритмам расчета их вероятностных характеристик. Так, во второй главе проведен анализ РеСМО с двумя типами событий – поступление и уход заявок из системы. Для РеСМО с дискретными требованиями к ресурсу и пуассоновским входящим потоком разработан сверточный алгоритм расчета вероятности потери и моментов числа занятых единиц ресурса. Для РеСМО с пуассоновским потоком заявок и интенсивностями поступления и обслуживания, зависящими от числа заявок в системе, доказано свойство нечувствительности к виду распределения времени обслуживания. Предложен метод анализ ресурсной системы с коррелированным MAP-потоком (Markov Arrival Process) заявок.

В исследуемых в третьей главе РеСМО добавляется третий тип событий – поступление сигнала, который вызывает изменение объема требуемого ресурса у некоторой заявки. В результате поступления сигналов заявка может продолжить обслуживание, либо прервать его. Разработаны точный и приближенный метод вычисления вероятностных характеристик таких РеСМО. В приближенном методе расчета используется имитирующая модель РеСМО без сигналов, но с дополнительным входящим потоком, для повышения точности метода используется вероятностное распределение не по времени, а по моментам окончания обслуживания.

Последующие главы имеют более прикладной характер. В четвертой главе приводятся результаты анализа производительности сети радиодоступа «Новое радио», использующей в миллиметровом диапазоне длин волн, и механизмов повышения непрерывности пользовательских сессий, включая механизм резервирования части ресурса, механизм мультисвязности, подразумевающий одновременное подключение к нескольким базовым станциям, а также их комбинации. Кроме того, проведен анализ влияния настойчивого поведения пользователей на параметры производительности таких сетей.

В пятой главе представлены результаты исследования сценариев функционирования с использованием нескольких технологий радиодоступа. Исследована добавочная пропускная способность, которую можно получить при использовании наряду с лицензированными еще и нелицензированные частоты. Также рассмотрена модель гетерогенной сети радиодоступа с совместным использованием миллиметрового и терагерцевого диапазонов частот, разработан метод анализа ее показателей эффективности.

Достоверность и новизна результатов диссертации

Диссертация содержит новые научные результаты, основные положения которых заключаются в следующем:

1. Для разработанной ранее РеСМО с пуассоновским потоком и дискретными требованиями заявок к ресурсу разработан новый сверточный алгоритм, который в процессе вычисления нормировочной константы стационарного распределения позволяет вычислять вероятностные характеристики.
2. Доказано свойство нечувствительности стационарного распределения к виду функции распределения времени обслуживания для РеСМО с интенсивностями поступления и обслуживания, зависящими от состояния системы. Ранее это свойство было известно для аналогичных систем с постоянными требованиями, а также для РеСМО с постоянными интенсивностями поступления и обслуживания.
3. Разработана новая модель РеСМО с третьим типом событий – поступление сигнала. Разработан точный метод расчета вероятностных характеристик, включая новую вероятность прерывания обслуживания, которую не исследовали в известных ранее моделях РеСМО.
4. Доказана теорема о мультипликативном виде стационарного распределения цепи Маркова, вложенной по моментам окончания обслуживания заявок в РеСМО без сигналов. Разработан метод

приближённого расчета вероятностных характеристик РеСМО с сигналами на основе имитирующей модели РеСМО без сигналов.

5. Были разработаны ряд новых моделей РеСМО, позволивших моделировать современные сценарии функционирования перспективных сетей радиодоступа и проводить оценку показателей их эффективности, включая механизмы резервирования ресурсов, множественных подключений с несколькими базовыми станциями и их комбинации, а также сценарии гетерогенных сетей с несколькими технологиями радиодоступа и совместным использованием лицензированного и нелицензированного диапазонов частот.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Степень обоснованности научных положений, результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается использованием современных подходов, математических методов и методов моделирования. Достоверность полученных результатов подтверждается тем, что теория построена на известных методах теории случайных процессов, теории массового обслуживания и математической теории телетрафика, используемых при доказательствах теорем, лемм и утверждений; установлено качественное совпадение частных случаев полученных автором моделей с известными моделями теории массового обслуживания и математической теории телетрафика; использован современный метод дискретно-событийного статистического моделирования для верификации результатов работы.

Результаты имитационных экспериментов, представленные в работе, демонстрируют высокую точность, что подтверждается тестированием моделей в условиях, приближенных к реальным сценариям работы сетей связи.

Достоверность научных результатов подтверждается их представлением на международных конференциях и публикациями в рецензируемых журналах, включенных в базы Scopus/WoS. Признание в научном сообществе свидетельствует о высоком уровне выполненной работы.

Практическая значимость рекомендаций подтверждается их внедрением в рамках научно-исследовательских проектов. Это обеспечивает возможность применения разработанных моделей и методов в целях повышения эффективности современных и перспективных сетей связи.

Ценность для науки и практики результатов работы

Результаты диссертационной работы имеют значимую ценность как для науки, так и для практики, предлагая новый подход к решению актуальных задач моделирования современных сценариев функционирования сетей радиодоступа, в том числе в высокочастотных диапазонах. Научная значимость работы заключается в развитии теоретических основ анализа и моделирования РеСМО, а также точных и приближенных методов расчета их вероятностных характеристик. Полученные результаты углубляют понимание методов распределения ресурса базовой станции беспроводной сети и дают качественно новые возможности для моделирования их особенностей функционирования.

Практическая ценность работы заключается в возможности применения разработанных моделей и методов для проектирования, оценки показателей эффективности и оптимизации работы сетей мобильной связи за счет предоставления нового инструментария, адаптированного под особенности перспективных технологий и современные сценарии функционирования. Представленные решения подходят для внедрения в реальных условиях.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати

Основные результаты диссертации изложены в 85 работах, из них 1 работа опубликована в журнале из списка ВАК, 8 работ в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в наукометрической базе RSCI, 50 работ в международных базах цитирования Scopus и WoS. По теме диссертации имеется также 15 зарегистрированных свидетельств на программу для электронных вычислительных машин, 2 монографии, и 3 учебных пособия.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям, представленным в диссертационной работе. В автореферате отражены ключевые аспекты исследования, включая актуальность темы, цели и задачи работы, научную новизну, теоретическую и практическую значимость полученных результатов.

Основные положения диссертации, включая разработку методов анализа расчета различных моделей РеСМО и их применения к анализу сценариев функционирования сетей радиодоступа достаточно полно изложены в автореферате. Содержание автореферата позволяет получить целостное представление о проделанной работе и достигнутых результатах. В автореферате представлены наиболее значимые выводы, подтвержденные

результатами имитационных экспериментов, а также апробацией на ведущих научных конференциях и публикациями в рецензируемых изданиях. Таким образом, автореферат четко и последовательно раскрывает содержание диссертации, обеспечивая его соответствие заявленным научным положениям и выводам.

Замечания по работе

1. В большинстве исследуемых в диссертации моделях используются пуассоновские потоки заявок с постоянной интенсивностью. Однако реальная нагрузка в телекоммуникационных сетях имеет явно выраженную периодичность, суточную, недельную, годовую. В диссертации следовало бы прокомментировать границы применимости полученных результатов в условиях реальных профилей нагрузки.
2. Стационарное распределение РеСМО с пуассоновскими входящими потоками в главе 2 записывается в мультипликативном виде с использованием многократных сверток функции распределения требований к ресурсу. Для случая дискретных требований к ресурсу автором разработан сверточный алгоритм расчета вероятностных характеристик. Однако практически ничего не сказано о методах вычисления этих сверток в случае непрерывной функции распределения. Диссертация бы только выиграла от более подробных разъяснений на этот счет.
3. В работе имеется ряд опечаток и стилистических погрешностей.

Приведенные замечания не снижают научную ценность результатов диссертационной работы и не влияют на ее положительную оценку.

Заключение

Диссертационное исследование Сопина Эдуарда Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной проблемы создания теоретических основ на базе ресурсных систем массового обслуживания для анализа и расчета показателей эффективности сетей радиодоступа в современных и перспективных системах мобильной связи, имеющей важное значение для внедрения и эффективной эксплуатации современных технологий мобильной связи. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, согласно п. 2.1 раздела II Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса

Лумумбы», утвержденного ученым советом РУДН протокол № УС-1 от 22.01.2024 г., а ее автор, Сопин Эдуард Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика.

Официальный оппонент Орлов Юрий Николаевич, доктор физико-математических наук (01.01.03 – Математическая физика), профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики имени М. В. Келдыша Российской академии наук», тел.: +7 (903) 757-39-43, e-mail: ov3159f@yandex.ru.

«01» сентября 2026 г.



Орлов Юрий Николаевич

Подпись Орлова Ю.Н. заверяю

Ученый секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

А.А. Давыдов



Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики имени М. В. Келдыша Российской академии наук»

Адрес: 125047, г. Москва, Миусская пл., д. 4

Тел.: +7 (499) 978-13-14. E-mail: office@keldysh.ru

Страница в интернете: <https://keldysh.ru>