

ОТЗЫВ

Зейфмана Александра Израилевича
на автореферат диссертации 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

Работа Сопина Эдуарда Сергеевича «Модели ресурсных систем массового обслуживания и их применения к анализу и расчету показателей эффективности беспроводных сетей» посвящена востребованной в современных телекоммуникациях проблеме – разработке и анализу математических моделей обслуживания сессий передачи данных в сетях радиодоступа пятого и последующих поколений с учетом их особенностей и в современных сценариях функционирования. Актуальность темы не вызывает сомнений, учитывая глобальный переход к сетям пятого и шестого поколений, в которых планируется внедрение технологий радиодоступа, использующих миллиметровый и даже субтерагерцевый диапазоны частот, характеризующихся высокой нестабильностью качества радиоканалов.

Автором разработан класс моделей ресурсных систем массового обслуживания, позволяющий учитывать особенности новых технологий радиодоступа и механизмов для повышения непрерывности пользовательских сессий, предлагаемых стандартизирующими организациями. Доказан ряд фундаментальных свойств этих моделей, разработаны точные и приближенные методы вычисления их вероятностно-временных характеристик. Кроме того, разработаны методы перехода от параметров сценария и особенностей технологии к параметрам модели ресурсной системы, что свидетельствует о завершенности проведенного исследования.

Научная новизна заключается в разработке сверточного алгоритма расчета вероятностных характеристик ресурсных систем, доказательстве свойства нечувствительности к виду функции распределения времени обслуживания, разработке нового класса ресурсных моделей – ресурсных систем массового обслуживания с сигналами, и метода их приближенного анализа. На базе разработанного теоретического инструментария автором построены новые модели обслуживания сессий передачи данных в сетях радиодоступа пятого и последующих поколений с учетом их особенностей.

Сформулированные в диссертации научные положения и выводы являются хорошо обоснованными. Диссертация вносит существенный вклад в развитие теории массового обслуживания и математической теории телетрафика. Практическая ценность работы не ограничивается рамками академических исследований. Разработанные модели и алгоритмы могут быть использованы при проектировании и оптимизации реальных сетей 5G/6G, в задачах радиочастотного планирования, при реализации в сетях радиодоступа механизмов повышения непрерывности сессий пере-

дачи данных. Кроме того, результаты работы применяются и в учебном процессе, что говорит об их методической ценности.

В качестве замечаний, которые, впрочем, не умаляют общих достоинств работы, можно отметить следующее.

1. Вычислительные алгоритмы для ресурсных систем разработаны только для случая дискретных требований к ресурсу. Диссертация бы только выиграла от дополнения вычислительными алгоритмами и для непрерывных требований к ресурсу.
2. В разделе 4.3 указано, что для расчета вероятностей потери и прерывания используется итерационный алгоритм. Следовало указать, при каких условиях этот алгоритм сходится.

Диссертационное исследование Сопина Эдуарда Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой, 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.

Зейфман Александр Израилевич, доктор физико-математических наук (01.01.11 – Системный анализ и автоматическое управление), профессор, заведующий кафедрой прикладной математики Вологодского государственного университета, e-mail: a_zeifman@mail.ru

Зейфман Александр Израилевич

14 сентября 2026 г.

Подпись Зейфмана А.И. удостоверяю



Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет»

Адрес: 160000, Россия, Вологодская обл., г. Вологда, ул. Ленина, д. 15.

Телефон: +7 (8172) 72-46-45.

E-mail: uk@vogu35.ru.

Страница в интернете: <http://vogu35.ru>

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических Сопина Эдуарда Сергеевича на тему
«Модели ресурсных систем массового обслуживания и их применения к
анализу и расчету показателей эффективности беспроводных сетей»
по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика.

Беспроводные сети связи к настоящему времени стали основным (самым массовым) средством доступа к современной инфокоммуникационной системе. Эволюция беспроводных сетей связи сопровождается повышением их основных показателей за счет применения более эффективных технологий и методов использования телекоммуникационных ресурсов. Обеспечение эффективного использования ресурсов является одной из основных задач построения сети связи, а в беспроводных сетях, где ресурсы являются, как правило, являются общими для множества пользователей повышение эффективности их использования отражается не показателях функционирования сети связи в целом.

При построении и эксплуатации сетей решается задача компромисса между объемом ресурсов, спросом на услуги и качеством их предоставления. Этот компромисс должен удовлетворять как пользователей услуг, обеспечением необходимого уровня качества, так и операторов связи и провайдеров услуг, приемлемых расходом ресурсов. Решение такого рода задач невозможно без адекватного модельно-методического аппарата, позволяющего получить. Такого рода аппарат должен соответствовать особенностям современных и перспективных сетей связи в части их потенциальных возможностей по распределению ресурсов и методам, а также особенностям спроса на ресурсы (обслуживанием трафика современных услуг).

Разработка такого модельно-методического аппарата представляет собой научную проблему, состоящую в решении ряда нетривиальных задач математического моделирования. Именно этому посвящена диссертационная работа Э.С. Сопина, цель которой состоит в разработке моделей ресурсных систем, методов их анализа и вычислительных алгоритмов для расчета показателей эффективности современных и перспективных беспроводных сетей связи.

В своей работе автор получает новые научные результаты:

1. Разработан метод построения функции распределения ступенчатого вида, описывающей случайные требования сессий пользователей к объему ресурса сети, который позволяет моделировать процесс обслуживания сессий на базовой станции с помощью системы массового обслуживания со случайными требованиями к ресурсам (РеСМО) с дискретными требованиями к ресурсу.

2. Разработан алгоритм вычисления стационарного распределения РеСМО с пуассоновским входящим потоком и дискретным распределением требований к ресурсу, который позволяет вычислять вероятность блокировки заявки, средний объем, дисперсию занятого ресурса и распределение требований потерянных заявок.

3. Для класса моделей РеСМО с пуассоновским входящим потоком и интенсивностями поступления и обслуживания, зависящими от числа заявок в системе, доказано свойство нечувствительности стационарного распределения к виду функции распределения времени обслуживания.

4. Разработаны модели РеСМО с сигналами, которые применимы для оценки показателей эффективности беспроводных сетей с дискретными ресурсными блоками.

5. Доказано, что замена РеСМО с сигналами на имитирующую РеСМО без сигналов с дополнительным потоком заявок, интенсивность которого вычисляется итерационно, позволяет приближенно вычислять вероятностные характеристики исходной СМО с сигналами.

6. Разработана модель РеСМО с сигналами и дискретной функцией распределения требований к ресурсу, которая применима к анализу показателей эффективности беспроводной сети пятого поколения «Новое радио».

7. Доказано, что расчет показателей эффективности обслуживания сессий в сети NR-U, использующей нелицензированные частоты совместно с лицензированными, может проводиться с помощью двух взаимоувязанных моделей. На первом этапе проводится расчет доли трафика, выгружаемого в нелицензируемые частоты, а также функции распределения требований к ресурсам выгружаемых сессий с использованием РеСМО. На втором этапе

вычисляется распределение скорости передачи данных в нелицензированном диапазоне.

Полученные результаты обладают научной новизной и имеют практическую значимость.

По материалу автореферата имеются следующие замечания:

1. В разделе 1.3 автор разработал метод построения функции распределения, описывающей случайные требования сессий пользователей к объему ресурсов сети. В этой модели автор рассматривает статичную картину распределения пользователей в зоне связи базовой станции, однако в сети подвижной связи пользователи перемещаются, поэтому выбор схемы модуляции и кодирования по текущему состоянию может оказаться не самым лучшим, возможно, следует использовать прогнозы изменения состояний.

2. Приведенный в разделе 4.3 анализ совместного механизма мультисвязности и резервирования ресурса слишком идеализирован: круговая область обслуживания, БС размещены на окружности на постоянном расстоянии друг от друга, пользователи распределены в круговой области согласно пуассоновскому точечному процессу. Интересно, как изменятся результаты, если модель будет отличаться от идеальной.

Указанные замечания не оказывают существенного влияния на положительную оценку работы в целом как законченного научного исследования.

Выводы.

По результатам рассмотрения автореферата, можно заключить, что диссертация Сопина Эдуарда Сергеевича на тему «Модели ресурсных систем массового обслуживания и их применения к анализу и расчету показателей эффективности беспроводных сетей» является завершенной самостоятельной научно-квалификационной работой, в которой содержатся научно-обоснованные результаты разработки моделей ресурсных систем, методов их анализа и вычислительных алгоритмов для расчета показателей эффективности современных и перспективных беспроводных сетей связи.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика.

Диссертация 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.

На включение персональных данных, содержащихся в отзыве, в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку согласен.

Профессор кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ
д.т.н., профессор.

.....

Александр Иванович Парамонов

08__ сентября 2026 г.

Парамонов Александр Иванович доктор технических наук (05.12.13 Системы, сети и устройства телекоммуникаций), профессор, профессор кафедры сетей связи и передачи данных, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича».

Телефон: +7(921) 756-15-23

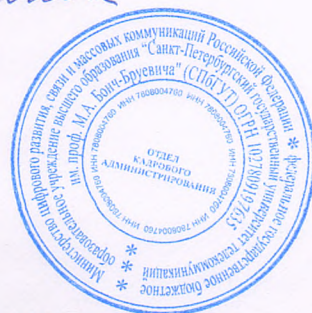
Email: alex-in-spb@yandex.ru

Юрий А.И. Парамонов
заведующий

Начальник
ОТДЕЛА КАДРОВОГО
АДМИНИСТРИРОВАНИЯ

О.В. ЖЕЛЕЗНИКОВА

10 СЕН 2026



ОТЗЫВ

Румянцева Александра Сергеевича
на автореферат диссертации 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

Диссертационная работа Сопина Э. С. посвящена разработке методов исследования так называемых ресурсных систем обслуживания с дискретными требованиями к ресурсу. Класс ресурсных систем имеет два основных подкласса: системы с неограниченной очередью и системы с потерями. Оба класса моделей имеют актуальные приложения: модели с неограниченной очередью применяются для исследования суперкомпьютеров, в то время как подкласс систем с потерями наиболее естественен для моделирования беспроводных сетей связи. К таким приложениям и обращается автор диссертационной работы.

С учетом специфики сетей радиодоступа поколений 5G+, Сопин Э. С. расширил класс ресурсных систем с потерями, отразив такие особенности приложений, как наличие управляющих сигналов, зависимость поступающего потока от состояния системы, подвижность устройств и нестабильность радиоканала. Важно отметить, что в ряде случаев автору удалось доказать свойство нечувствительности стационарного распределения состояний системы к виду функции распределения времени обслуживания заявок, что позволило получить важные характеристики систем в явном виде, что несомненно составляет теоретическую значимость работы. В то же время, работа очевидно имеет и практическую значимость: анализу подвергаются беспроводные сети конкретных, востребованных и актуальных конфигураций (например, сети WiGig), выполняется расчет параметров сетей, обеспечивающих требуемые характеристики качества обслуживания (вероятности потери, передачи, коллизии, блокировки маршрута), выполняются расчеты на основе реальных конфигураций и делаются практические выводы на основе сравнительного анализа.

К научной новизне работы следует отнести ряд доказанных математических результатов, включая теорему о нечувствительности стационарного распределения системы к распределению времени обслуживания при фиксированном среднем в случае, когда интенсивность поступления зависит от состояния системы, а также ряд вычислительных методов и алгоритмов, включая метод приближенного анализа ресурсной системы обслуживания с сигналами с использованием вспомогательной ресурсной системы без сигналов, что несомненно развивает направление исследования ресурсных систем обслуживания в теории массового обслуживания.

Автореферат соответствует и в достаточной мере отражает основные положения диссертационной работы. В то же время, по мнению автора настоящего отзыва, следует отметить такие замечания:

1. Специфика выбранных методов и стремление к получению аналитических результатов обусловили выбор экспоненциального распределения в качестве распределения времени обслуживания в большинстве рассматриваемых моделей, однако такой выбор представляется достаточно ограничительным в современных сетях.
2. Представляется, что с использованием полученных результатов можно было бы уделить больше внимания решению задач оптимизации параметров исследуемых сетей.
3. Имеется некоторое количество опечаток, таких как «из них 50 работа опубликованы» (стр. 9),

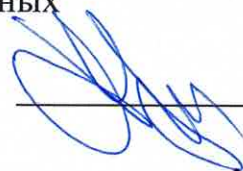
Отмеченные выше замечания не снижают ценности диссертационной работы в целом.

Диссертационное исследование Сопина Эдуарда Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой, 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.

Румянцев Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук (05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории стохастического моделирования информационно-вычислительных и телекоммуникационных систем Института прикладных математических исследований Карельского научного центра Российской академии наук, e-mail: ar0@krc.karelia.ru.

Руководитель лаборатории стохастического моделирования
информационно-вычислительных и телекоммуникационных
систем ИПМИ КарНЦ РАН,
д.ф.-м.н., в.н.с. Румянцев Александр Сергеевич



«14» сентября 2026 г.

Сведения об организации:

Институт прикладных математических исследований – обособленное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального
исследовательского центра "Карельский научный центр Российской академии наук"
Адрес: 185910, Россия, республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11.
Телефон: +7 (8142) 76-33-70.

E-mail: math@krc.karelia.ru.

Страница в интернете: <http://mathem.krc.karelia.ru/>



ОТЗЫВ

Соколова Николая Александровича
на автореферат диссертации 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

Беспроводные телекоммуникационные сети, с момента их возникновения и до настоящего времени, прошли впечатляющий путь количественного и качественного развития. В ближайшие годы процесс эволюции беспроводных телекоммуникационных сетей получит дальнейший импульс развития. Данный факт требует формирования новой теоретической базы, без которой невозможно решить ряд сложных задач, имеющих практическое значение. Одно из актуальных направлений представляет собой разработку моделей ресурсных систем массового обслуживания (РеСМО) и их исследование с целью расчета характеристик эффективности. При этом необходимо учитывать свойства беспроводных ресурсов, атрибуты которых разительно отличаются от показателей проводных средств электросвязи. В результате модели ресурсных СМО усложняются, что требует проведения глубоких теоретических исследований. По этим причинам тема диссертационной работы Сопина Эдуарда Сергеевича представляется несомненно актуальной.

В работе корректно поставлены и удачно решены новые научные задачи, к которым, по мнению автора настоящего отзыва, относятся:

- выбор адекватной математической модели требований к ресурсу современной базовой станции, имеющий специфические особенности;
- создание методов анализа стохастических характеристик ресурсных СМО и соответствующих вычислительных алгоритмов с учетом возможных законов распределения интервалов между поступлением требований и длительности их обслуживания;

- построение моделей СМО с учетом меняющихся требований к ресурсу и свойствам радиосигналов, а также разработка соответствующих методов расчета, включая точные и приближенные вычислительные алгоритмы;
- разработка методов расчета характеристик эффективности гетерогенных сетей с разными технологиями радиодоступа.

Диссертационная работа Э.С. Сопина несомненно обладает научной новизной. Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается корректным применением адекватного математического аппарата и доказана при помощи проведения имитационного моделирования. Результаты исследований очень достойно представлены в авторитетных изданиях и апробированы на научных форумах. Сведения о реализации новых научных результатов, приведенные в автореферате, свидетельствуют о ее практической ценности.

Автореферат соответствует и в достаточной мере отражает основные положения диссертационной работы. В то же время, по мнению автора настоящего отзыва, следует отметить такие замечания:

1. В диссертационной работе часто используется выражение «расчет показателей». В технической документации на элементы телекоммуникационных сетей показатели обычно нормируются (например, величина допустимых потерь или среднее время задержки), а рассчитываются характеристики.

2. Формулы (37) – (39) в разделе 4.2 задают систему уравнений равновесия, которая численно решается для получения стационарного распределения. Следовало указать, какие численные методы могут быть применены, может ли матрица системы быть приведена к некоторому специальному виду, позволяющему использовать эффективные численные алгоритмы.

Отмеченные выше замечания не снижают ценности диссертационной работы в целом.

Диссертационное исследование Сопина Эдуарда Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой, 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.

Соколов Николай Александрович, доктор технических наук (05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций), старший научный сотрудник, директор по науке ООО «ПРОТЕЙ СТ», e-mail: nicksokolov@hotmail.com.

Директор по науке ООО «ПРОТЕЙ СТ»,
д.т.н., с.н.с. Соколов Николай Александрович

« 17 » августа 2026 г.



Сведения об организации:

ООО «Протей СТ»

Адрес: 194044, Россия, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский, д. 60А,
Бизнес-центр «ТЕЛЕКОМ».

Телефон: +7 (812) 449-47-27.

E-mail: sales@protei.ru.

Страница в интернете: <https://protei-st.ru/>

ОТЗЫВ

Цитовича Ивана Ивановича
на автореферат диссертации 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

Рассматриваемая диссертационная работа Сопина Эдуарда Сергеевича «Модели ресурсных систем массового обслуживания и их применения к анализу и расчету показателей эффективности беспроводных сетей» посвящена актуальной проблеме математического моделирования перспективных сетей радиодоступа. Стремительное развитие технологий 5G и перспективы внедрения 6G сетей обуславливают острую необходимость в создании адекватных математических моделей, позволяющих анализировать механизмы управления сессиями передачи данных с учетом особенностей использования миллиметрового и субтерагерцевого диапазонов частот.

Содержательная часть диссертации демонстрирует системный подход, что свидетельствует о глубоком понимании автором современных проблем математического моделирования телекоммуникационных систем. Разработаны методы анализа ресурсных систем массового обслуживания и вычислительные алгоритмы, позволяющие оценивать показатели эффективности высокочастотных беспроводных сетей, а также предложены подходы к описанию особенностей технологии радиодоступа и параметров сценария функционирования в терминах функции распределения требований к ресурсу. Многообразие рассмотренных в прикладных главах сценариев подчеркивает комплексный характер исследования.

Научная новизна работы обоснована и подтверждается разработкой оригинальных моделей ресурсных систем массового обслуживания, учитывающих особенности современных и перспективных беспроводных сетей. Достоверность полученных результатов обеспечивается строгим применением методов теории марковских процессов, теории массового обслуживания. Разработанные алгоритмы расчета вероятностных характеристик и показателей эффективности демонстрируют математическую строгость и вычислительную реализуемость.

Ценность проведенного исследования для науки заключается в существенном развитии теории массового обслуживания и математического аппарата теории телетрафика, разработки методологии анализа эффективности высокочастотных сетей радиодоступа. Для практики в области телекоммуникаций важность работы определяется возможностью применения разработанных моделей и алгоритмов при проектировании и оптимизации сетей 5G/6G. Образовательная составляющая работы подтверждается успешным внедрением результатов в учебный процесс университета. Вместе с тем, хотелось бы обратить внимание автора на некоторые аспекты, которые могли бы усилить работу:

1. Следовало бы указать вычислительную сложность разработанного в разделе 2.1 сверточного алгоритма расчета вероятностных характеристик ресурсной системы массового обслуживания.
2. В разделе 4.1 при параметризации процесса возникновения блокировок пути прямого распространения сигнала предполагается, что блокатор передвигается согласно модели RDM (Random Direction Model), подразумевающей движение с постоянной скоростью и регулярной сменой направления. Можно было бы не ограничиваться одной, достаточно простой моделью, а сравнить ее с более сложной, в которой допускались бы, к примеру, периоды неподвижности блокаторов.

Отмеченные выше замечания не снижают ценности диссертационной работы в целом.

Диссертационное исследование Сопина Эдуарда Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой, 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.

Цитович Иван Иванович, доктор физико-математических наук (05.13.17 – Теоретические основы информатики), доцент, профессор кафедры алгоритмов и технологий программирования физтех-школы прикладной математики и информатики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», e-mail: tsit@mail.ru.



« 17 » сентября 2026 г.

Цитович Иван Иванович

Подпись Цитовича И.И. заверяю



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Адрес: 117303 Москва, ул. Керченская, д. 1А, корп. 1

Тел.: +7 (495) 408-45-54. Факс: +7 (495) 408-68-69. E-mail: info@mipt.ru

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

ОТЗЫВ

Кучерявого Андрея Евгеньевича
на диссертацию 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

Диссертационная работа Сопина Эдуарда Сергеевича «Модели ресурсных систем массового обслуживания и их применения к анализу и расчету показателей эффективности беспроводных сетей» посвящена решению фундаментальной научной проблемы, имеющей важное теоретическое и прикладное значение, – созданию математического аппарата на базе теории ресурсных систем массового обслуживания для анализа и расчета сетей радиодоступа пятого и шестого поколений в современных сценариях функционирования.

Внедрение в рамках развития сетей пятого поколения новой технологии радиодоступа «Новое радио», использующей, в том числе, диапазон миллиметровых длин волн, порождает новый класс задач, связанный с исследованиями их возможностей в современных сценариях функционирования сетей мобильной связи. Радиоканалы в этом диапазоне частот характеризуются резкими колебаниями отношения сигнала к шуму, вызванными блокировками путей прямого распространения сигнала даже небольшими подвижными объектами, как тела людей или автомобили. Колебания качества радиоканала могут приводить к прерыванию пользовательских сессий передачи данных, в связи с чем предлагается ряд решений для повышения непрерывности сессий, такие как механизмы мультисвязности, подразумевающие соединения с несколькими базовыми станциями, временную выгрузку трафика на базовые станции, использующих другие технологии радиодоступа и другие. Существующие аналитические модели зачастую не в состоянии адекватно описать такие сценарии. Возникает необходимость адаптации и развития классического аппарата математической теории телетрафика и теории массового обслуживания. Представленная диссертационная работа направлена на восполнение этого пробела.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Введение содержит обоснование актуальности, цель и задачи исследования, а также список положений, выносимых на защиту. В первой главе проведен обзор известных результатов в области исследования систем массового обслуживания с неоднородными требованиями к ресурсу, рассмотрены два основных подхода к построению случайного процесса, описывающего функционирование ресурсной системы массового обслуживания. Кроме того, представлен разработанный автором метод описания особенностей сети радиодоступа и сценария функционирования в виде вероятностного распределения требований к ресурсу.

Главы 2 и 3 представляют собой систематическое изложение теоретических результатов анализа ресурсных систем. Доказаны ряд фундаментальных свойств этих систем, разработаны эффективные вычислительные алгоритмы. В третьей главе исследованы ресурсные модели с сигналами, которые позволяют моделировать особенности механизмов повышения непрерывности сессий передачи данных при использовании миллиметрового диапазона частот.

Главы 4 и 5 посвящены прикладным аспектам моделирования сетей радиодоступа. Проведен анализ моделей механизмов мультисвязности, резервирования части ресурса, изучено влияние настойчивого поведения пользователей на показатели эффективности системы. Кроме того, проанализированы модели гетерогенных сетей, в которых используются более одной технологии радиодоступа, в том числе сети с использованием нелицензированного диапазона частот.

Достоверность результатов работы обеспечивается тем, что все построенные модели основаны на строгом аппарате теории марковских процессов и теории массового обслуживания. Переход от описания телекоммуникационной системы к ее формальной математической модели осуществляется с явным указанием допущений, что позволяет четко определить границы применимости полученных результатов. Представленные в работе доказательства теорем и лемм являются корректными. Основные результаты работы прошли международную экспертизу, о чем свидетельствует 50 публикаций в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Научная новизна работы заключается в том, что разработан новый свёрточный алгоритм расчета вероятностных характеристик ресурсных систем массового обслуживания с дискретными требованиями к ресурсу. Доказано свойство нечувствительности стационарного распределения ресурсной системы с пуассоновским входящим потоком к виду функции распределения времени обслуживания. Разработана новая модель ресурсной системы массового обслуживания с сигналами, при поступлении которых сигнала заявка изменяет требуемый объём ресурсов. Разработан метод приближённого анализа ресурсной системы массового обслуживания с сигналами. Метод базируется на использовании имитирующей ресурсной системы без сигналов, что позволяет использовать полученные ранее аналитические результаты. Для расчёта вероятности прерывания применяется распределение по цепи Маркова, вложенной по моментам окончания обслуживания. Разработаны модели ресурсных систем, позволяющие вычислять показатели эффективности современных и перспективных сетей радиодоступа с учетом их особенностей, таких как подвижность пользовательских устройств, возникновение блокировок прямого пути распространения сигнала в сетях миллиметрового диапазона частот и связанная с ними нестабильность радиоканала, а также механизмов повышения показателей непрерывности пользовательских сессий.

Высокая степень обоснованности всех научных положений и выводов работы обеспечивается строгим применением аппарата марковских процессов и теории массового обслуживания. Аналитические результаты (утверждения, теоремы) имеют корректные доказательства.

Научная ценность работы заключается в развитии математического аппарата теории телетрафика и теории массового обслуживания. В диссертации изложена методология анализа показателей эффективности сетей радиодоступа пятого и шестого поколений, включая метод перехода от особенностей технологии и параметров сценария к параметрам математической модели, теоретические результаты анализа ресурсных систем и алгоритмы расчета их вероятностных характеристик. Практическая ценность результатов выражается в том, что разработанные модели и алгоритмы позволяют операторам связи и производителям оборудования проводить количествен-

ную оценку эффективности различных механизмов сетей 5G/6G на этапе проектирования. Результаты работы были использованы в выполненных научно-исследовательских работах по грантам, что свидетельствует об их востребованности для решения актуальных прикладных задач. Созданные на основе результатов работы программы для ЭВМ и учебные курсы способствуют подготовке высококвалифицированных кадров.

Основные научные результаты диссертационной работы прошли широкую научную апробацию и в полном объеме опубликованы в авторитетных российских и международных изданиях. Общее количество публикаций по теме диссертации составляет 85 работ, что существенно превышает установленные требования. Наиболее значимыми являются 50 работ, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science, включая статьи в высокорейтинговых журналах Q1 (IEEE Communications Surveys & Tutorials, IEEE Transactions on Wireless Communications, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Mathematics, и др.). Публикации в рецензируемых журналах RSCI (8 работ) и в издании из перечня ВАК (1 работа) дополнительно подтверждают признание результатов российским научным сообществом.

Автореферат полностью и адекватно отражает основное содержание и научные результаты диссертации. Все ключевые элементы исследования нашли свое отражение в автореферате.

Оценка работы положительная, однако имеются несколько замечаний:

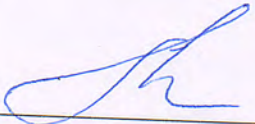
1. В главах 4 и 5 предполагается, что пользовательские устройства распределены согласно пуассоновскому точечному процессу. Однако в реальных городских сценариях всегда существуют некоторые «точки притяжения», в которых плотность пользователей значительно выше, чем в остальной области покрытия. Хотелось бы увидеть, насколько изменятся результаты в случае более сложной модели расположения устройств.
2. В разделе 4.1 получено выражение для вероятности блокировки пути прямого распространения сигнала для пользовательского устройства, находящегося на

некотором расстоянии g от базовой станции. Однако в разделе 5.2 эта вероятность считается константой для всех пользователей и не зависит от расстояния g . Следовало подробнее объяснить, с чем это связано.

Отмеченные замечания не снижают высокой оценки диссертации в целом.

Диссертационное исследование Сопина Эдуарда Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой, 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.

Кучерявый Андрей Евгеньевич, доктор технических наук (2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций), профессор, заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», e-mail: akouch@mail.ru.


«11» сентября 2026 г.

Подпись Кучерявого А.Е. заверяю

Начальник
Управления персоналом
СНБГУТ
А.Д. Смородинцева

Кучерявый Андрей Евгеньевич



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

Адрес: 193232, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22к1.

Телефон: +7 (812) 326-31-63.

E-mail: rector@sut.ru.

Страница в интернете: <http://sut.ru/>