

*На правах рукописи*

Иванова Дарья Вадимовна

**МОДЕЛИ СОВМЕСТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ  
ТРАФИКА С ПРИОРИТИЗАЦИЕЙ И РАЗДЕЛЕНИЕМ  
РЕСУРСОВ В ПРОМЫШЛЕННОМ РАЗВЕРТЫВАНИИ  
МОБИЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

Специальность 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

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

Научный кандидат физико-математических наук, доцент, доцент  
руководитель: кафедры теории вероятностей и кибербезопасности  
Российского университета дружбы народов имени Патриса  
Лумумбы

**Маркова Екатерина Викторовна**

Официальные **Моисеева Светлана Петровна**  
оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой теории вероятностей и  
математической статистики, Федеральное государственное  
автономное образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный исследовательский Томский  
государственный университет»

**Горшенин Андрей Константинович**

доктор физико-математических наук, доцент, главный  
научный сотрудник, руководитель отдела, Федеральный  
исследовательский центр «Информатика и управление»  
Российской академии наук

**Агеев Кирилл Анатольевич**

кандидат физико-математических наук, директор по  
управлению проектами, Банк ВТБ (публичное акционерное  
общество)

Защита диссертации состоится 14 марта 2025 г. в 15 часов 00 минут 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, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета ПДС 0200.006

к.ф.-м.н., доцент

М.Н. Геворкян

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Промышленная автоматизация является важным сценарием использования беспроводных сетей пятого поколения (англ. Fifth Generation, 5G) и характеризуется крайне высокими требованиями к качеству обслуживания на беспроводном участке доступа. Например, для управления подвижными элементами производственного оборудования системы требуют сверхнадежной передачи данных с низкими задержками (англ. Ultra-Reliable Low Latency Communication, URLLC). В то же время, для систем видеонаблюдения и позиционирования необходима поддержка усовершенствованной мобильной широкополосной связи (англ. enhanced Mobile Broadband, eMBB). Обеспечить условия для функционирования новых приложений должна технология 5G NR (англ. New Radio). Базовые станции 5G NR должны одновременно поддерживать услуги, предъявляющие принципиально разные требования к качеству обслуживания, поэтому реализация одновременной поддержки URLLC и eMBB услуг, генерирующих кардинально отличающиеся типы трафика в беспроводных сетях 5G, является сложной и актуальной проблемой, требующей разработки новых подходов, алгоритмов и моделей обслуживания такого трафика. Таким образом, диссертационная работа посвящена актуальной задаче разработки и анализа моделей одновременной передачи нескольких типов трафика с различными механизмами обслуживания.

**Степень разработанности темы.** Исследованиям беспроводных сетей, построению моделей систем массового обслуживания, а также применяемым для их анализа методам теории массового обслуживания, математической теории телетрафика, теории вероятностей и теории случайных процессов посвящены работы ведущих российских и зарубежных ученых и специалистов: Башарин Г.П., Бочаров П.П., Вишневский В.М., Гайдамака Ю.В., Горшенин А.К., Дудин А.Н., Зейфман А.И., Кучерявый А.Е., Кучерявый Е.А., Моисеев А.Н., Моисеева С.П., Молчанов Д.А., Мутханна

А.А., Назаров А.А., Наумов В.А., Печинкин А.В., Пшеничников А.П., Рыков В.В., Самуйлов К.Е., Степанов С.Н., Цитович И.И., Шоргин С.Я., Andrews J.G., Correia L.M., Dohler M., Iversen V.B., Kelly F.P., Logothetis M.D., Malanchini I., Pagano M., Roberts J.W., Ross K.W. и др.

**Целью диссертационной работы** является разработка моделей совместного обслуживания трафика с приоритизацией и разделением ресурсов для расчета и анализа показателей эффективности при промышленных развертываниях мобильных сетей.

Для достижения этой цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**.

1. Разработка и анализ марковских моделей для одновременного обслуживания трафика разных типов с прерыванием передачи в условиях промышленного развертывания мобильных сетей.
2. Разработка модели мультисервисной мобильной сети с реализацией механизма прерывания передачи менее приоритетного трафика на основе алгоритма выбора запросов на передачу трафика, обслуживание которых должно быть прервано.
3. Разработка и анализ моделей схем доступа к ресурсам сети с резервированием индивидуальных зон и прерыванием / без прерывания передачи менее приоритетного трафика.

**Научная новизна** диссертационной работы:

1. Модель схемы одновременного предоставления услуг с реализацией явного приоритета учитывает особенности совместного обслуживания разных типов трафика в промышленных развертываниях беспроводных сетей, а также динамическую блокировку в процессе передачи данных между устройствами. Ранее влияние условий развертывания сети на процесс совместного обслуживания трафика исследовано не было.
2. Стационарное распределение вероятностей состояний системы для модели схемы доступа к ресурсам сети с резервированием индивидуальных зон получено не только путем численного решения

системы уравнений равновесия, но и в мультипликативном виде. Ранее для моделей совместного обслуживания трафика разных типов предлагалось только численное решение системы уравнений равновесия.

3. Построенная модель мультисервисной мобильной сети позволяет провести сравнение различных вариантов стратегий обслуживания, основанных на приоритетах и резервировании, с точки зрения производительности, ориентированной как на пользователя, так и на оператора. Ранее исследования моделей совместного обслуживания разных типов трафика не содержали подробного сравнения производительности систем для различных стратегий передачи данных с точки зрения пользователя и оператора.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Полученные в ходе диссертационного исследования результаты могут использоваться операторами для развертывания и эксплуатации сетей 5G NR, а также обеспечения гарантированного уровня качества обслуживания трафика.

Разработанные математические модели и программные комплексы могут быть применены для управления ресурсами беспроводных сетей, расчета показателей эффективности и оценки производительности развертывания сетей 5G NR.

**Методы исследования.** В диссертационной работе применяются методы теории вероятностей, теории массового обслуживания, математической теории телетрафика и статистического моделирования.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Модель одновременной передачи потокового и эластичного трафика с приоритетами и снижением скорости обслуживания позволяет рассчитать вероятностные характеристики и оценить эффективность применяемой стратегии с точки зрения уровня качества обслуживания и использования ресурсов.

2. Модель промышленного развертывания беспроводных сетей связи пятого поколения применима для выбора оптимальной стратегии передачи двух типов трафика, позволяющей избежать создания дополнительной интерференции и демонстрирующей лучшие характеристики по сравнению с другими стратегиями.
3. Модель совместного обслуживания произвольного числа типов трафика с алгоритмом численной оптимизации параметров, определяющих минимальное число единиц ресурса для удовлетворения требований к качеству обслуживания, позволяет анализировать различные схемы разделения ресурсов с точки зрения вероятности блокировки, вероятности прерывания обслуживания, а также коэффициента использования ресурсов.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Основные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования по данной теме, докладывались на следующих научных конференциях:

- международная конференция «Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications» (г. Москва, 2020);
- международная конференция «12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops» (г. Брно, 2020).

Основные результаты опубликованы в ведущих научных журналах: Mathematics (Q2), Future Internet (Q2), IEEE Access (Q1), Lecture Notes in Computer Science (Q3), Информатика и ее применения (Q4), Вестник Томского государственного университета (Q4), а также в трудах международных конференций, индексируемых в Web of Science и Scopus.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы включены в исследования в рамках проекта РФФИ № 20-37-70079 «Исследование и разработка моделей и интеллектуальных алгоритмов совместного обслуживания трафика с малыми задержками и широкополосного доступа в беспроводных сетях пятого поколения», проекта

РНФ № 22-79-10053 «Разработка моделей и алгоритмов обслуживания критичного к задержке и надежности доставки трафика в сценариях промышленной автоматизации на основе беспроводных систем 5G+», а также проекта РУДН № 021937-2-000 «Модели математической теории телетрафика для анализа приоритетного обслуживания потокового и эластичного трафика в сетях новых поколений».

**Публикации.** Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, опубликованы в 7 печатных изданиях [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7], входящих в базу данных Scopus/Web of Science, в 2 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ [8, 9]. В работах [1, 4, 6, 7], выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит построение математических моделей, вывод формул для расчета вероятностных характеристик, разработка программного обеспечения для расчета характеристик, проведение численного анализа; в работе [2] – построение математической модели, вывод формул для расчета вероятностных характеристик; в работах [3, 5] – построение математических моделей, вывод формул для расчета вероятностных характеристик, проведение численного анализа; в работах [8, 9] – разработка программного обеспечения для расчета характеристик прерывания передачи трафика при реализации приоритетного обслуживания.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** исследуются сценарии использования беспроводных сетей пятого поколения в промышленной автоматизации, а также модели совместного обслуживания различных типов трафика. Раздел 1.1 посвящен особенностям развертывания беспроводных сетей пятого поколения в промышленной среде. В разделе 1.2 модель схемы одновременного предоставления услуг, генерирующих потоковый и эластичный трафик, на основе приоритетов со снижением скорости обслуживания описана с помощью системы массового обслуживания (СМО), где потоковый трафик имеет более высокий приоритет. Система связи, в которой пользователям предоставляются услуги двух типов: URLLC услуга, генерирующая потоковый трафик, и eMBB услуга, генерирующая эластичный трафик, имеет емкость  $C$  каналов. Запросы на предоставление услуг, генерирующих потоковый трафик, – запросы первого типа, и услуг, генерирующих эластичный трафик, – запросы второго типа, представляют собой пуассоновские потоки с интенсивностями  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  соответственно, средние длительности обслуживания запросов на предоставление услуг –  $\mu_1^{-1}$  и  $\mu_2^{-1}$ . Требование к числу базовых цифровых каналов (БЦК), необходимых для предоставления услуги, генерирующей потоковый трафик, равно  $b_1$ ,  $b_1 \geq 1$ . Рассматриваются две стратегии обслуживания эластичного трафика:

1. Фиксированная стратегия, при которой минимальное число БЦК, требуемых для обслуживания запроса на передачу эластичного трафика, равно  $b_2^{\min}$ ,  $b_2^{\min} \geq 1$ . В случае недостаточности ресурсов для передачи потокового трафика обслуживание одного или нескольких запросов на передачу эластичного трафика может быть прервано.



2. Гибкая стратегия, при которой число БЦК, требуемых для обслуживания запроса на передачу эластичного трафика, равно  $b_2^{\min_1}$ ,  $b_2^{\min_1} \geq 1$ , а при недостаточности ресурсов для передачи потокового трафика число БЦК, требуемых для обслуживания запроса на передачу эластичного трафика, может быть снижено до порогового значения  $b_2^{\min_2}$ ,  $b_2^{\min_2} < b_2^{\min_1}$ . При снижении числа доступных ресурсов ниже порогового значения обслуживание одного или нескольких запросов на передачу эластичного трафика может быть прервано (рис. 1).

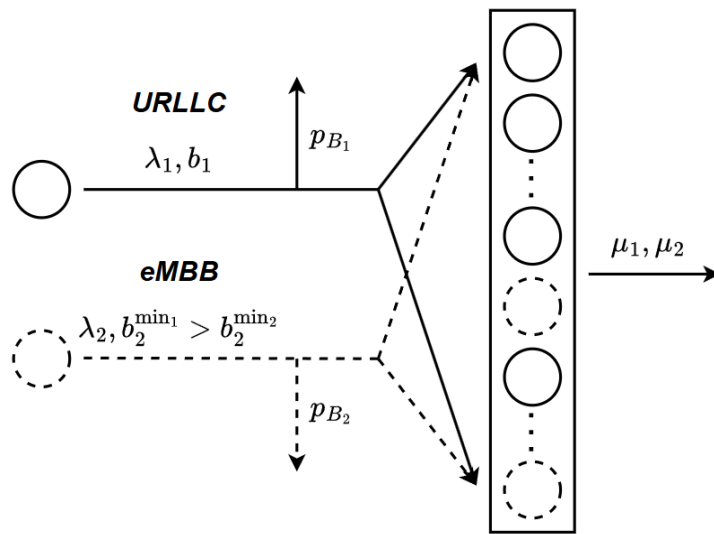


Рис. 1. Схема модели с приоритетным обслуживанием потокового трафика.

Максимальное число запросов первого типа, обслуживаемых в системе,  $N_1 = \left\lfloor \frac{C}{b_1} \right\rfloor$ , запросов второго типа –  $N_2 = \left\lfloor \frac{C}{b_2^{\min_1}} \right\rfloor$ . Функционирование рассматриваемой системы описывает двумерный марковский случайный процесс (СП)  $\{(N_1(t), N_2(t)), t \geq 0\}$ , где  $N_1(t)$  – число обслуживаемых системой запросов первого типа, а  $N_2(t)$  – число обслуживаемых системой запросов второго типа в момент времени  $t$ . Состояние системы описывает двумерный вектор  $(n_1, n_2)$ , где  $n_k = \{0, \dots, N_k\}$  – число обслуживаемых

системой запросов  $k$ -го типа  $k = 1, 2$ . Тогда пространство состояний системы имеет вид

$$\mathbf{X} = \left\{ (n_1, n_2) : 0 \leq n_1 \leq N_1, 0 \leq n_2 \leq N_2, n_1 b_1 + n_2 b_2^{\min_2} \leq C \right\}. \quad (1)$$

**Утверждение 1.** Стационарное распределение  $p(n_1, n_2)$ ,  $(n_1, n_2) \in \mathbf{X}$ , вероятностей состояний СП  $\{(N_1(t), N_2(t)), t \geq 0\}$  определяется путем численного решения системы уравнений равновесия (СУР):  $\mathbf{p}^T \cdot \mathbf{A} = \mathbf{0}^T$ ,  $\mathbf{p}^T \cdot \mathbf{1} = 1$ , где  $\mathbf{A}$  – матрица интенсивностей переходов, элементы которой определены следующим образом:

$$a\left((n_1, n_2), (n_1', n_2')\right) = \begin{cases} \lambda_1, & \text{если } n_1' = n_1 + 1, n_2' = n_2, n_1 < N_1, b_1(n_1 + 1) + b_2^{\min_2} n_2 \leq C, \\ & \text{или } n_1' = n_1 + 1, n_2' = l(n_1 + 1), n_1 < N_1, n_2 > 0, b_1(n_1 + 1) + b_2^{\min_2} n_2 > C; \\ \lambda_2, & \text{если } n_1' = n_1, n_2' = n_2 + 1, n_2 < N_2, b_1 n_1 + b_2^{\min_1} (n_2 + 1) \leq C; \\ n_1 \mu_1, & \text{если } n_1' = n_1 - 1, n_2' = n_2, n_1 > 0; \\ n_2 \mu_2, & \text{если } n_1' = n_1, n_2' = n_2 - 1, n_2 > 0; \\ \varphi, & \text{если } n_1' = n_1, n_2' = n_2; \\ 0 & \text{в ином случае,} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \varphi = & -\left( \lambda_1 \cdot I\{n_1 < N_1, b_1(n_1 + 1) + b_2^{\min_2} n_2 \leq C\} + \right. \\ & + \lambda_1 \cdot I\{n_1 < N_1, n_2 > 0, b_1(n_1 + 1) + b_2^{\min_2} n_2 > C\} + \\ & \left. + \lambda_2 \cdot I\{n_2 < N_2, b_1 n_1 + b_2^{\min_1} (n_2 + 1) \leq C\} + n_1 \mu_1 + n_2 \mu_2 \right). \end{aligned} \quad (3)$$

В разделе 1.3 на основе полученного распределения вероятностей состояний системы проведен расчет вероятностно-временных характеристик модели и их численный анализ. Исследования, представленные в разделах 1.1–1.3 диссертационной работы, показали, что в области анализа обслуживания URLLC и eMBB трафика в беспроводных сетях пятого поколения ранее в основном рассматривались механизмы их отдельной поддержки. В то же время, существующие исследования моделей совместного обслуживания различных типов трафика не содержат

подробного сравнения производительности систем при различных вариантах стратегий передачи данных, например, основанных на резервировании и приоритетах, с точки зрения пользователя и с точки зрения оператора. Рассматриваемые ранее традиционные методы совместного обслуживания разных типов трафика, основанные на полном резервировании или не предусматривающие разделения ресурсов, приводят либо к неэффективному использованию радиоресурсов, либо к невозможности обеспечить требуемый уровень качества обслуживания.

В связи с этим, в разделе 1.4 ставится задача исследований диссертационной работы, представляющих собой разработку марковских моделей совместного обслуживания различных типов трафика в промышленных развертываниях беспроводных сетей, а также численный анализ показателей эффективности этих моделей.

**Во второй главе** разрабатывается и анализируется модель промышленного развертывания беспроводных сетей с приоритетным обслуживанием на базовой станции (БС) с прямой передачей между устройствами (D2D-передача). В разделе 2.1 представлена системная модель схемы одновременного предоставления услуг двух типов с использованием явного приоритета, а также рассмотрены три стратегии передачи данных с учетом динамической блокировки в промышленных развертываниях беспроводных сетей: I) передача трафика через БС; II) D2D-передача с полной координацией через БС; III) D2D-передача без координации через БС.

В разделе 2.2 построена математическая модель, получено распределение вероятностей состояний системы, выведены формулы для расчета вероятностных характеристик.

**Утверждение 2.** Вероятность блокировки запросов на передачу URLLC трафика рассчитывается по формуле

$$B_1 = \sum_{n_1=0}^{k(N_1)} p(N_1, n_1). \quad (4)$$

**Утверждение 3.** Вероятность блокировки запросов на передачу eMBB трафика рассчитывается по формуле

$$B_2 = \sum_{n_1=0}^{N_1} p(n_1, k(n_1)). \quad (5)$$

**Утверждение 4.** Вероятность прерывания обслуживания запроса на передачу eMBB трафика рассчитывается по формуле

$$\Pi = \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{\substack{n_2=k(n_1)+1 \\ k(n_1) \neq k(n_1+1)}}^{k(n_1)} \frac{\lambda_1 p(n_1, n_2)}{\lambda_1 + \lambda_2 \cdot I\{n_2 < k(n_1)\} + n_1 \mu_1 + n_2 \mu_2}. \quad (6)$$

В разделе 2.3 выполнен расчет характеристик модели в зависимости от плотности развертывания БС, плотности размещения оборудования (рис. 2) и других параметров системы, проведен сравнительный анализ рассмотренных стратегий.

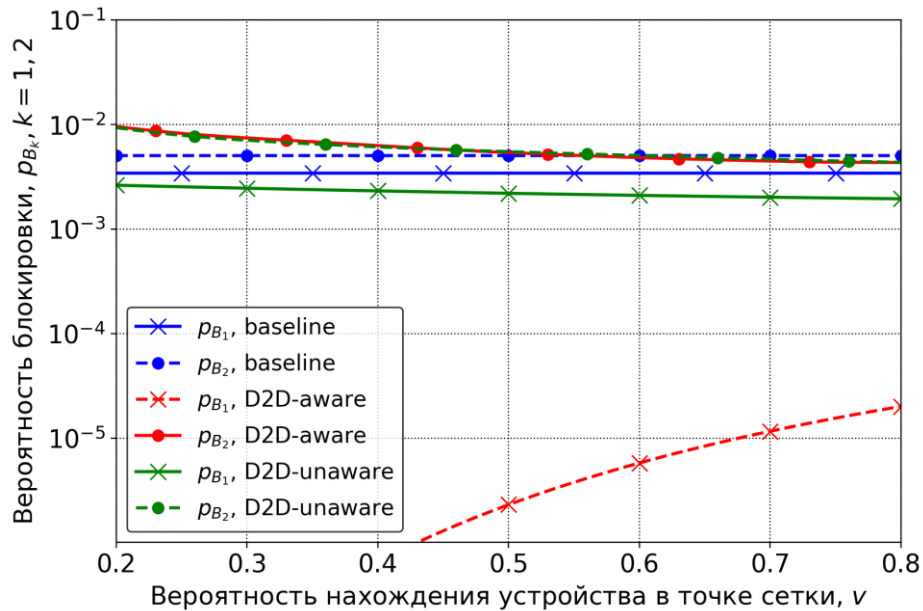


Рис. 2. Вероятность блокировки запросов на передачу URLLC/eMBB трафика в зависимости от плотности размещения пользовательских устройств.

Полученные численные результаты показывают, что дисциплина обслуживания с приоритетами обеспечивает достаточную изоляцию приоритетного URLLC трафика, критичного к задержкам, от eMBB трафика с более низким приоритетом. Стратегия с поддержкой D2D, при которой

прямая передача координируется через БС, с точки зрения значения вероятности блокировки превосходит стратегию, при которой координация через БС не используется, а также базовую стратегию, при которой весь трафик направляется через БС NR. Предложенные методы могут быть использованы для оценки требуемой плотности размещения БС NR в промышленных развертываниях таким образом, чтобы были обеспечены гарантии производительности для URLLC и eMBB трафика.

**Третья глава** посвящена разработке и анализу моделей для мультисервисной сети с резервированием индивидуальных зон и приоритизацией. В разделе 3.1 построена модель схемы доступа с прерыванием обслуживания для произвольного числа услуг, генерирующих потоковый и/или эластичный трафик. Модель описана в виде СМО с  $K$  типами запросов, для которых требования к ресурсам системы являются эластичными, т.е. могут меняться в некоторых пределах  $[b_k^{\min}, b_k^{\max}]$ ,  $k = 1, \dots, K$ . Запросы  $k$ -го типа поступают с интенсивностями  $\lambda_k$ , образуя пуассоновские потоки, время обслуживания запросов распределено по экспоненциальному закону со средним  $\mu_k^{-1}$ . Обозначим  $\rho_k = \lambda_k / \mu_k$  интенсивность предложенной нагрузки, создаваемой запросами  $k$ -го типа,  $k = 1, \dots, K$ . Предполагается, что  $g_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , БЦК зарезервированы для каждого типа запросов, и  $\sum_{k=1}^K g_k < C$ , где  $C$  каналов – емкость всей системы. В таком случае  $c = C - \sum_{k=1}^K g_k$  представляет собой общий пул, доступный для запросов любого типа. Максимальное число запросов  $k$ -го типа, которое может находиться в системе,  $N_k = \lfloor (C - \sum_{i \neq k} g_i) / b_k^{\min} \rfloor$ , тогда число обслуживаемых системой запросов  $k$ -го типа  $n_k = 0, \dots, N_k$ ,  $i, k = 1, \dots, K$ . Максимальное гарантированное число запросов  $k$ -го типа, которое может быть обслужено в системе,  $N_k^g = \lfloor g_k / b_k^{\min} \rfloor$ ,  $N_k^g \leq N_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ .

Состояние системы описывает  $K$ -мерный вектор  $\mathbf{n} = (n_1, \dots, n_K)$  над пространством состояний

$$\mathbf{X} = \left\{ \mathbf{n} : 0 \leq n_k \leq N_k, k = 1, \dots, K, \sum_{i=1}^K \max \{ n_i b_i^{\min}, g_i \} < C \right\}. \quad (7)$$

Число БЦК  $b_k(\mathbf{n})$ ,  $b_k^{\min} \leq b_k(\mathbf{n}) \leq b_k^{\max}$ , выделяемых при обслуживании запросов  $k$ -го типа в состоянии  $\mathbf{n}$ , может изменяться в зависимости от состояния системы и определяется следующим образом:

$$b_k(\mathbf{n}) = \min \left\{ \frac{C - \max \left\{ \sum_{i \neq k} g_i, \sum_{i=1}^{k-1} \max \{ n_i b_i(\mathbf{n}), g_i \} + \sum_{i=k+1}^K \max \{ n_i b_i^{\min}, g_i \} \right\}}{n_k}, b_k^{\max} \right\}. \quad (8)$$

Предполагается, что запросы разных типов имеют разные приоритеты в обслуживании, упорядоченные следующим образом: запросы первого типа имеют высший приоритет, запросы  $K$ -го типа – низший. Если при поступлении в систему запроса  $k$ -го типа БЦК для его обслуживания с минимальным требованием  $b_k^{\min}$  недостаточно, обслуживание одного или нескольких менее приоритетных запросов может быть прекращено. Предположим, что  $K$ -мерный вектор определяет число запросов каждого типа, обслуживание которых необходимо прервать при поступлении запроса типа  $j$ ,  $\mathbf{m} = (m_1, \dots, m_K)$ .

Пространство состояний системы  $\mathbf{X}$  для каждого типа запросов является объединением множеств приема  $\mathbf{S}_k^{pre}$  и блокировки  $\mathbf{B}_k$  запросов  $k$ -го типа. Множество приема запросов  $\mathbf{S}_k^{pre}$  – множество состояний, в которых поступающие в систему запросы  $k$ -го типа принимаются на обслуживание:

$$\begin{aligned}
\mathbf{S}_k^{pre} = & \left\{ \mathbf{n} \in \mathbf{X} : n_k < N_k, \left( \sum_{i=1}^{k-1} \max \{n_i b_i(\mathbf{n} + \mathbf{e}_k), g_i\} + \sum_{i=k+1}^K \max \{n_i b_i^{\min}, g_i\} + \right. \right. \\
& + (n_k + 1) b_k^{\min} \leq C \vee \left( k < K, \sum_{i=1}^{k-1} \max \{n_i b_i(\mathbf{n} + \mathbf{e}_k), g_i\} + (n_k + 1) b_k^{\min} + \right. \\
& \left. \left. + \sum_{i=k+1}^K \max \{n_i b_i^{\min}, g_i\} - \sum_{i=k+1}^K b_i^{\min} (n_i - N_i^g) \cdot I(n_i > N_i^g) \leq C \right) \right\}, k = 1, \dots, K.
\end{aligned} \tag{9}$$

Множество блокировки запросов  $\mathbf{B}_k$  – множество состояний, в которых поступающие в систему запросы  $k$ -го типа блокируются из-за отсутствия свободных ресурсов:

$$\begin{aligned}
\mathbf{B}_k = & \left\{ \mathbf{n} \in \mathbf{X} : n_k = N_k \vee \sum_{i=1}^{k-1} \max \{n_i b_i(\mathbf{n} + \mathbf{e}_k), g_i\} + \sum_{i=k+1}^K \max \{n_i b_i^{\min}, g_i\} + \right. \\
& \left. + (n_k + 1) b_k^{\min} - \sum_{i=k+1}^K b_i^{\min} (n_i - N_i^g) \cdot I(n_i > N_i^g) > C \right\}, k = 1, \dots, K.
\end{aligned} \tag{10}$$

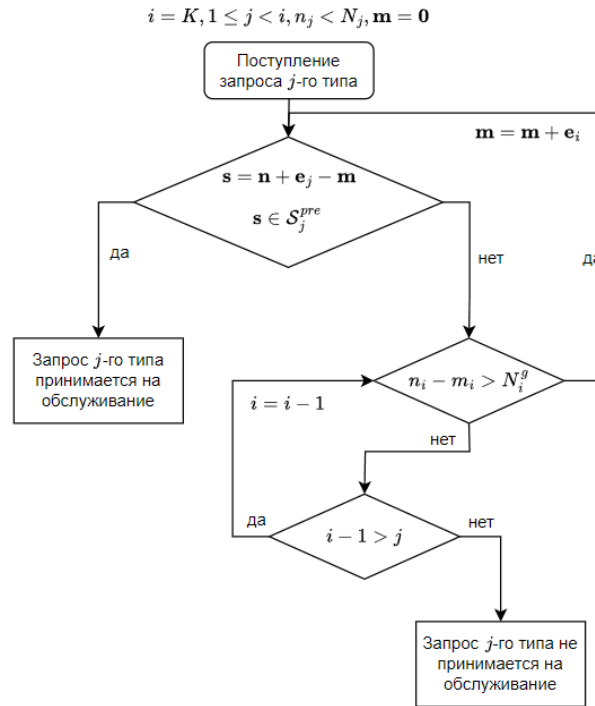


Рис. 3. Блок-схема алгоритма выбора запросов, обслуживание которых должно быть прервано.

В разделе 3.2 рассмотрен частный случай модели с резервированием и без прерывания обслуживания запросов на передачу менее приоритетного трафика.

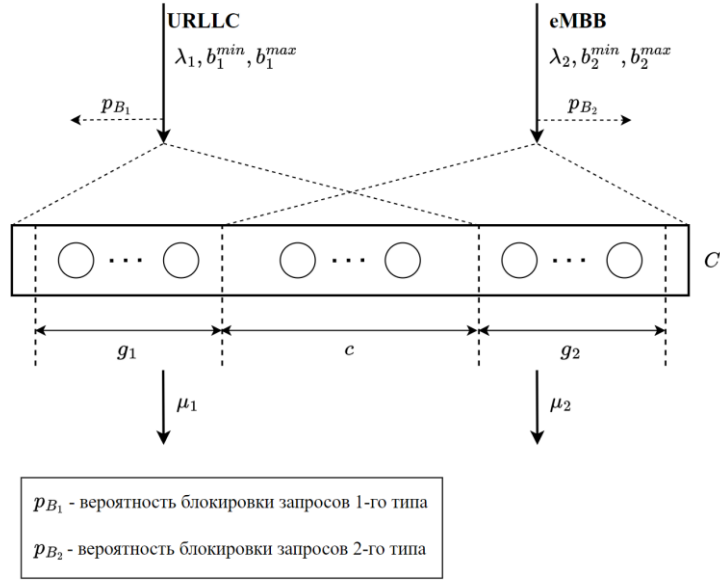


Рис. 4. Схема модели с резервированием ресурсов для передачи URLLC и eMBB трафика.

**Утверждение 5.** Стационарное распределение вероятностей состояний системы представимо в мультипликативном виде:

$$p(n_1, n_2) = \frac{\rho_1^{n_1} \rho_2^{n_2}}{n_1! n_2!} p(0, 0), \quad (11)$$

где  $(n_1, n_2) \in \mathbf{X} = \left\{ \mathbf{n} : 0 \leq n_k \leq N_k, \sum_{i=1}^2 \max \{ n_i b_i^{\min}, g_i \} \leq C, k = 1, 2 \right\}$ ,

$$p(0, 0) = \left( \sum_{n_1=0}^{N_1} \sum_{n_2=0}^{N_2} \frac{\rho_1^{n_1} \rho_2^{n_2}}{n_1! n_2!} \right)^{-1}. \quad (12)$$

В разделе 3.3 рассмотрен частный случай модели с резервированием и прерыванием обслуживания менее приоритетного трафика. В разделе 3.4 проведена численная оптимизация параметров для обеспечения гарантий производительности трафика. На основе построенных моделей СМО проведен сравнительный анализ пяти стратегий разделения ресурсов: I) отсутствие резервирования и приоритетов (DYN); II) приоритетное обслуживание с прерыванием, но без резервирования (DYN+PRE); III) полное резервирование ресурсов (RES); IV) частичное резервирование без прерывания (DYN+RES); V) частичное резервирование с прерыванием (DYN+RES+PRE).



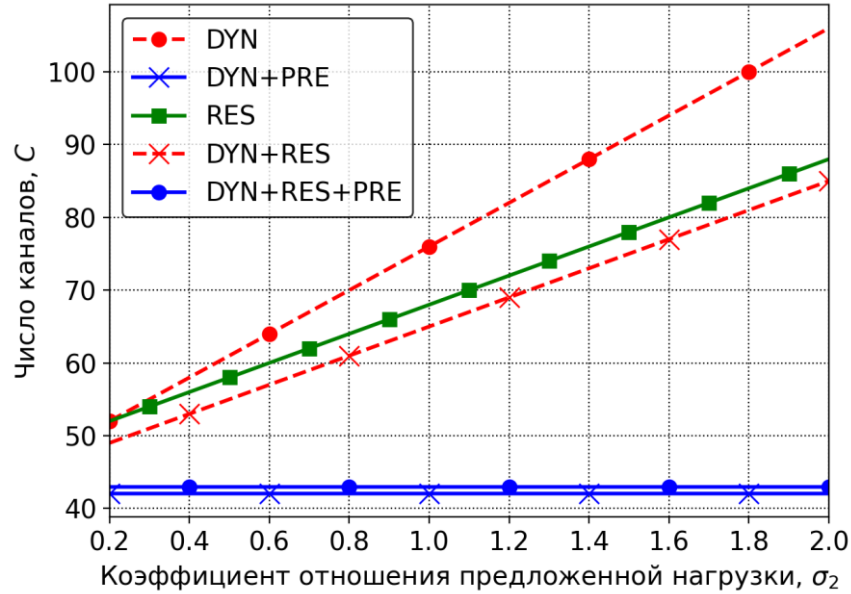


Рис. 5. Зависимость минимальных требований к числу каналов от коэффициента отношения предложенной нагрузки.

На рис. 5 минимальные требования к числу БЦК представлены в виде функции аргумента  $\sigma_2 = \rho_2/\rho_1$ , при этом интенсивность поступления запросов  $\lambda_2$  на передачу eMBB трафика увеличивается, в то время как интенсивность поступления запросов  $\lambda_1$  на передачу URLLC трафика остается постоянной. Согласно полученным результатам, прерывание без резервирования (на рис. 5 DYN+PRE) является одной из двух лучших схем с точки зрения числа занятых каналов и сравнима с наиболее сложной схемой, сочетающей в себе как резервирование, так и прерывание (на рис. 5 DYN+RES+PRE).

В **заключении** представлены основные результаты диссертационного исследования.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В заключение сформулируем основные результаты и выводы, полученные в рамках диссертационной работы.

1. Исследованы особенности моделей беспроводных сетей при промышленном развертывании. Предложена модель схемы доступа к ресурсам мобильной сети со снижением скорости передачи эластичного трафика. Получено численное решение СУР. Проведен анализ вероятности блокировки, вероятности прерывания обслуживания запросов, коэффициента использования ресурсов и доли времени, в течение которого запросы обслуживаются со сниженной скоростью, позволяющий дать рекомендации по планированию сети, удовлетворяющей требованиям к качеству обслуживания.
2. Разработана модель одновременного предоставления услуг с реализацией явного приоритета, учитывающая особенности совместного обслуживания разных типов трафика в условиях промышленного развертывания мобильных сетей. Проведен сравнительный анализ показателей эффективности модели с потоковым, критичным к задержкам, и эластичным трафиком для трех стратегий передачи данных, позволяющий оценить требуемую плотность размещения базовых станций для обеспечения гарантий уровня качества обслуживания трафика.
3. Разработана модель совместного обслуживания произвольного числа типов трафика с резервированием индивидуальных зон и приоритетами. Разработан алгоритм выбора запросов, обслуживание которых должно быть прервано. Для модели предложено аналитическое решение СУР, а также получены элементы инфинитезимальных матриц, необходимых для численного решения. Проведен сравнительный анализ различных стратегий распределения ресурсов с точки зрения вероятностей блокировки и использования ресурсов сети.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Работы в изданиях, входящих в базы данных Scopus/Web of Science*

1. Ivanova D., Markova E., Moltchanov D., Pirmagomedov R., Koucheryavy Y., and Samouylov K. Performance of Priority-Based Traffic Coexistence Strategies in 5G mmWave Industrial Deployments // *IEEE Access*. – 2022. – Vol. 10. – P. 9241–9256. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3143583.
2. Kondratyeva A., Ivanova D., Begishev V., Markova E., Mokrov E., Gaidamaka Y., Samouylov K. Characterization of Dynamic Blockage Probability in Industrial Millimeter Wave 5G Deployments // *Future Internet*. – 2022. – Vol. 14, No. 7. – P. 193. DOI: 10.3390/fi14070193.
3. Иванова Д.В., Жбанкова Е.А., Маркова Е.В., Гайдамака Ю.В. Модели совместного обслуживания трафика eMBB и URLLC на основе приоритетов в промышленных развертываниях 5G NR. *Информ. и её примен.* – 2023. – Т. 17, № 4. – С. 64–70. DOI: 10.14357/19922264230409.
4. Ivanova D., Adou Y., Markova E., Gaidamaka Y., and Samouylov K. Mathematical Framework for Mixed Reservation- and Priority-Based Traffic Coexistence in 5G NR Systems // *Mathematics*. – 2023. – Vol. 11, No. 4. – P. 1046. DOI: 10.3390/math11041046.
5. Иванова Д.В., Жбанкова Е.А., Маркова Е.В., Гайдамака Ю.В. СМО с прерыванием обслуживания для моделирования нарезки радиоресурсов в беспроводных сетях 5G. *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. – 2023. – №65. – С. 36–46. DOI: 10.17223/19988605/65/4.
6. Markova E., Moltchanov D., Pirmagomedov R., Ivanova D., Koucheryavy Y., Samouylov K. Prioritized Service of URLLC Traffic in Industrial Deployments of 5G NR Systems // *Lecture Notes in Computer Science*. – Switzerland, Springer International Publishing Switzerland. – 2020. – Vol. 12563. – P. 497–509. DOI: 10.1007/978-3-030-66471-8\_38.

7. Markova E., Moltchanov D., Pirmagomedov R., Ivanova D., Koucheryavy Y. and Samouylov K. Priority-based Coexistence of eMBB and URLLC Traffic in Industrial 5G NR Deployments // Proc. of 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – 2020. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ICUMT51630.2020.9222433.

*Прочие публикации*

8. Иванова Д.В., Маркова Е.В. Расчет характеристик прерывания передачи eMBB трафика в сетях 5G при реализации абсолютного приоритета в обслуживании URLLC // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № RU2021661768, 15.07.2021 г.
9. Иванова Д.В., Маркова Е.В., Молчанов Д.А. Расчет характеристик прерывания передачи eMBB трафика в сетях 5G при реализации относительного приоритета в обслуживании URLLC трафика // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № RU2021661641, 14.07.2021 г.

**Иванова Дарья Вадимовна (Россия)**

**МОДЕЛИ СОВМЕСТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА С  
ПРИОРИТИЗАЦИЕЙ И РАЗДЕЛЕНИЕМ РЕСУРСОВ В  
ПРОМЫШЛЕННОМ РАЗВЕРТЫВАНИИ МОБИЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

Диссертационная работа посвящена разработке марковских моделей совместного обслуживания трафика с приоритизацией и разделением ресурсов, описанных в виде системы массового обслуживания и применимых для анализа систем связи, требующих одновременной передачи сверхнадежного трафика с низкими задержками (англ. Ultra-Reliable Low Latency Communication, URLLC) и мобильного трафика широкополосного доступа (англ. enhanced Mobile Broadband, eMBB) в условиях промышленного развертывания беспроводных сетей. Исследованы особенности совместного обслуживания различных типов трафика в промышленных развертываниях беспроводных сетей, с учетом которых предложены модели с реализацией явного приоритета. Разработана модель совместного обслуживания произвольного числа различных типов трафика с резервированием индивидуальных зон и приоритетами. Проведен сравнительный анализ показателей эффективности моделей для различных стратегий передачи трафика и распределения ресурсов.

**Ivanova Daria Vadimovna (Russia)**

**TRAFFIC COEXISTENCE MODELS WITH PRIORITIZATION  
AND RESOURCE RESERVATION IN INDUSTRIAL DEPLOYMENT OF  
MOBILE NETWORKS**

The thesis is focused on the development of traffic coexistence models with prioritization mechanisms and resource reservations, formalized in terms of queueing systems and applicable to the analysis of cellular systems requiring simultaneous support for ultra-reliable low-latency communication (URLLC) and enhanced mobile broadband (eMBB) services in industrial deployments of wireless networks. Taking into account the researched features of multiple traffic types coexistence in industrial deployments, models with an explicit prioritization have been proposed. A model for an arbitrary number of different traffic types with system resource reservations and priorities has been developed. A comparative analysis of system performance measures for different traffic transmission and resource allocation strategies was carried out.