

*На правах рукописи*



Власкина Анастасия Сергеевна

**МОДЕЛИ С ЭЛАСТИЧНЫМ ТРАФИКОМ И СИГНАЛАМИ ДЛЯ  
АНАЛИЗА И РАСЧЁТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
НАРЕЗКИ СЕТЕВЫХ РЕСУРСОВ**

Специальность 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

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

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

**Кочеткова Ирина Андреевна**

Официальные оппоненты: **Моисеев Александр Николаевич**

доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой программной инженерии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

**Парамонов Александр Иванович**

доктор технических наук, доцент, 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»

**Агеев Кирилл Анатольевич**

кандидат физико-математических наук, эксперт-аналитик дивизиона технологического развития корпоративного бизнеса общества с ограниченной ответственностью «Группа Компаний «Иннотех» (ООО «ГК «Иннотех»)

Защита диссертации состоится 17 ноября 2023 г. 15:00 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 «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ПДС 0200.006  
канд. физ.-мат. наук, доц.



А.В. Демидова

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** В сетях пятого (англ. 5th Generation, 5G) и последующих поколений (англ. Next Generation Networks, NGN) одной из важнейших технологий является нарезка сети (англ. Network Slicing). Она позволяет разделять вычислительные, сетевые и радиоресурсы базового оператора между сегментами сети для виртуальных операторов. Отношения между сторонами регулируют соглашения о качестве обслуживания (англ. Service Level Agreement, SLA), где в том числе указывается распределение ресурса между сегментами сети в условиях нормальной загрузки. Такое распределение будем называть начальным или тем, которое соответствует SLA. С изменением нагрузки может возникать простой ресурса одного сегмента при ожидающих начала обслуживания запросах другого виртуального оператора. Потребуется динамическое перераспределение ресурса, которым управляет контроллер, периодически направляющий служебные сообщения/сигналы для проверки необходимости перераспределения ресурса. С одной стороны, частые сигналы позволят гибко подстраивать нарезку сети под потребности виртуальных операторов, с другой – возрастает сигнальная нагрузка от служебных сообщений. Возникает проблема выбора процедуры и объема перераспределения ресурса по сигналам контроллера с учетом трех факторов – соответствия начальному распределению ресурса, его занятости и доли сигналов, завершившихся перераспределением ресурса. Таким образом, диссертационная работа посвящена актуальной задаче разработки и анализа таких моделей динамической нарезки радиоресурсов для услуги передачи данных, генерирующей эластичный трафик.

**Степень разработанности темы.** В настоящее время вопросами исследования и анализа беспроводных сетей пятого и шестого поколений активно занимаются ведущие российские и зарубежные ученые. Применение технологии нарезки сети вносит свои особенности в построение моделей беспроводных сетей. Среди ученых, внесших вклад в развитие этой области, можно отметить Вишневого В.М., Гайдамака Ю.В., Кучерявого А.Е., Кучерявого Е.А., Молчанова Д.А., Мутханна А.А., Парамонова А.И., Пшеничникова А.П., Самуйлова К.Е., Сопина Э.С., Степанова С.Н., Correia L., Taleb T. Классическими методами анализа беспроводных сетей являются теория массового обслуживания, математическая теория телетрафика и теория случайных процессов, которые также применяются в диссертационной работе. Значительный вклад в развитие этой области внесли ученые Башарин Г.П., Гайдамака Ю.В., Горшенин А.К., Дудин А.Н., Моисеев А.Н., Моисеева С.П., Назаров А.А., Самуйлов К.Е., Степанов С.Н., Цитович И.И.

В диссертационной работе для построения моделей перераспределения ресурса применяются разные классы систем массового обслуживания.

Исследованию моделей с эластичным трафиком и дисциплиной разделения процессора посвящены работы ученых Башарина Г.П., Яшкова С.Ф., Altman E., Boucherie R.J., Voxma O.J., Logothetis M.D., Roberts J.W., Telek M. Значительный вклад в исследования систем массового обслуживания с сигналами внесли ученые Наумов В.А., Сопин Э.С. Вопросами построения моделей управляемых систем массового обслуживания занимались Горцев А.М., Ефросинин Д.В., Рыков В.В., Семенова О.В., Howard R.A.

**Целью диссертационной работы** является разработка моделей с нетерпеливым эластичным трафиком и минимальной скоростью передачи для анализа и расчета показателей эффективности динамической нарезки радиоресурсов по сигналам в беспроводной сети.

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

- Разработка моделей нарезки сети с нетерпеливым эластичным трафиком и минимальной скоростью передачи и двумя стратегиями перераспределения ресурса по сигналам – фиксированной и с управлением выбором объема ресурса.
- Анализ и разработка алгоритмов расчета показателей эффективности нарезки сети, отражающих занятость ресурса, соответствие распределения ресурса соглашению о качестве обслуживания, вероятность перераспределения ресурса по сигналу, а также влияние на показатели частоты поступления сигналов.

**Научная новизна** диссертационной работы.

1. Модель динамической нарезки радиоресурсов в виде системы массового обслуживания с эластичным трафиком включает контроллер, который отправляет поток сигналов на проверку необходимости перераспределения ресурса. Ранее в системах массового обслуживания, применявшихся для моделирования нарезки ресурсов, перераспределение могло произойти в любой момент времени при изменении состояния системы.
2. Построенная управляемая система массового обслуживания моделирует выбор объема перераспределения ресурса для динамической нарезки радиоресурсов. Ранее рассматривались системы с фиксированной стратегией либо с использованием методов машинного обучения для перераспределения ресурса.
3. В формулировку задачи выбора частоты поступления сигналов и объема перераспределения ресурса заложены занятость ресурса, соответствие распределения ресурса соглашению о качестве обслуживания, вероятность перераспределения ресурса по сигналу. Ранее в системах массового обслуживания, применявшихся для моделирования нарезки ресурсов,

исследовались показатели обслуживания пользователей виртуального операторов.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Полученные в диссертационной работе результаты по основным соотношениям между параметрами исследуемых систем и качеством обслуживания пользователей могут применяться для успешного развертывания и эксплуатации сетей операторами связи и обеспечения соглашений SLA в случае нехватки радиоресурсов.

Разработанные математические модели могут быть использованы при управлении ресурсами беспроводных сетей для оптимизации разделения пропускной способности сети. Учет коэффициентов занятости ресурса, соответствия соглашению SLA, доли результативных сигналов позволяет динамически перераспределять ресурс между сегментами сети. Построенная имитационная модель может быть использована для определения подходящих интервалов времени между поступлением сигналов контроллера с учетом загрузки сети для уменьшения простоя ресурса и выполнения минимальных требований к скорости передачи данных.

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

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Система массового обслуживания с нетерпеливым эластичным трафиком, минимальной скоростью передачи и перераспределением ресурса по сигналам, матричный алгоритм расчета стационарного распределения позволяют рассчитать показатели эффективности нарезки ресурсов как со стороны базового оператора – вероятность перераспределения ресурса по сигналу, так и со стороны виртуальных операторов – вероятность блокировки запроса на передачу эластичного трафика.
2. Управляемая система массового обслуживания с эластичным трафиком и стратегией выбора объема перераспределения ресурса по сигналам, итерационный алгоритм вычисления оптимальной стратегии применимы для настройки параметров динамической нарезки сети с учетом простоя ресурса, отклонения распределения ресурса от значений в соглашении о качестве обслуживания, вероятности перераспределения ресурса по сигналу.
3. Дискретно-событийная модель для произвольного числа сегментов сети с алгоритмом перераспределения ресурса позволяет настроить частоту поступления сигналов для максимизации взвешенных коэффициентов использования ресурса и соответствия распределения ресурса соглашению о качестве обслуживания, вероятности перераспределения ресурса по сигналу.

**Степень достоверности и апробация результатов** обеспечивается корректным использованием строгих математических доказательств, а также численными экспериментами с применением имитационного моделирования и численного анализа. Основные результаты диссертационной работы представлены на всероссийских и международных конференциях и семинарах:

- международная молодежная научная конференция «Математическое и программное обеспечение информационных, технических и экономических систем» (г. Томск, ТГУ, 2019, 2020);
- конференция «XIII Всероссийское совещание по проблемам управления» (г. Москва, ИПУ РАН, 2019);
- всероссийская конференция с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (г. Москва, РУДН, 2019-2023);
- международная конференция «International Conference on Next Generation Wired/Wireless Advanced Networks and Systems» (г. Санкт-Петербург, 2019, 2020).

Основные результаты опубликованы в ведущих научных журналах: *Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science*, *Lecture Notes in Computer Science*, *Информатика и ее применение*, *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика*, а также в трудах международных конференций, индексируемых в *Web of Science* и *Scopus*.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы включены в исследования по грантам Министерства науки и высшего образования РФ (грант Президента РФ) № 075-15-2019-1124 «Вероятностные модели сегментации радиоресурсов беспроводных сетей и методы расчета характеристик обслуживания пользователей», 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» и научному проекту РУДН «Разработка моделей и алгоритмов нарезки радиоресурсов и приоритетного доступа в беспроводной сети 6G».

**Публикации.** Основные результаты диссертации изложены в 10 работах [1-10] в том числе в 5 изданиях, входящих в международные базы данных *Scopus/Web of Science* [1-5], в 1 издании, рекомендованном ВАК РФ [6], в свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ [7,8].

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой** главе представлены предварительные исследования в области управления ресурсами, анализ одного сегмента сети, а также аппарат управляемых систем массового обслуживания. Раздел 1.1 посвящен общим принципам управления радиоресурсами в беспроводных сетях пятого поколения при использовании технологии нарезки сети. В разделе 1.2 представлен явный вид стационарного распределения для модели обслуживания пользователей одного сегмента сети с эластичным трафиком и минимальной скоростью передачи данных, построена имитационная модель для анализа вероятностно-временных характеристик. В разделе 1.3 приводится мультипликативный вид стационарного распределения для фиксированного разделения ресурса между виртуальными операторами. Раздел 1.4 содержит исследование задачи управления занятием ресурсов в модели облачных вычислений из двух групп виртуальных машин, записана функция получаемого среднего вознаграждения, построена имитационная модель для анализа показателей эффективности. Исследования, представленные в разделах 1.1–1.4 диссертационной работы, показали, что в области анализа моделей нарезки ресурсов ранее в основном рассматривались системы с фиксированной политикой управления ресурсами, либо с использованием методов машинного обучения для перераспределения ресурсов, при этом перераспределение могло произойти в любой момент времени при изменении состояния системы.

Распределение радиоресурсов базового оператора между двумя виртуальными операторами/сегментами показано на рисунке 1. Как видно из схемы, нерешенной задачей является планирование ресурсов при изменении нагрузки на сеть, когда возникают ситуации простоя одного сегмента при наличии ожидающих запросов другого сегмента. Проверка необходимости перераспределения ресурсов при каждом изменении состояния системы может позволить гибко настроить систему, однако увеличит сигнальную нагрузку на сеть. Поэтому в диссертационной работе рассматривается контроллер, который направляет сигналы о проверке системы с некоторой периодичностью.

При внедрении динамического перераспределения ресурсов по сигналу контроллера возникает задача настройки частоты поступления этих сигналов таким образом, чтобы повысить пропускную способность сети. Ранее в системах массового обслуживания, применявшихся для моделирования нарезки ресурсов, исследовались показатели обслуживания пользователей виртуальных операторов. Однако в диссертационной работе предлагается учитывать показатели

эффективности самой нарезки сети с точки зрения занятости ресурса, соответствия распределения ресурса соглашению о качестве обслуживания, вероятности перераспределения ресурса по сигналу. При этом возможность перераспределения ресурсов только по сигналу контроллера накладывает ограничения, связанные с выбором нового объема ресурсов, предоставляемого виртуальным операторам (по какому правилу и на сколько двигать границу между сегментами сети).

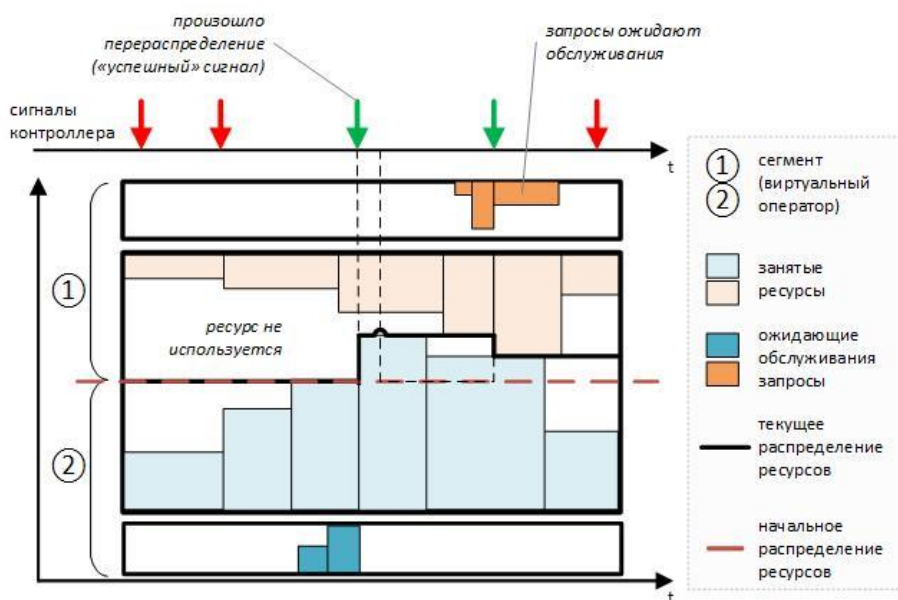


Рис. 1. Динамическое перераспределение ресурса по сигналу

**Вторая глава** рассматривает модель с фиксированной политикой перераспределения ресурсов между двумя сегментами сети. При этом раздел 2.1 содержит фиксированный алгоритм управления ресурсами модели при воздействии внешних сигналов контроллера о перераспределении, когда движение границы осуществляется на все свободные ресурсы. Как и в главе 1, модель строится в виде системы массового обслуживания (СМО) с нетерпеливым эластичным трафиком с минимально-гарантированной скоростью обслуживания и потоком сигналов, которые моделируют сообщения от контроллера (рис. 2).

Предположим, что входящие потоки запросов на передачу эластичного трафика являются пуассоновскими с интенсивностями  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , объем трафика распределен по экспоненциальному закону с параметрами  $\mu_1$  и  $\mu_2$ . С учетом минимального порога для скорости передачи трафика  $b$  максимальное число одновременно обслуживаемых сессий составляет  $N = \lfloor V/b \rfloor$ , где  $V$  общая пропускная способность, а число мест в очереди для ожидающих начала обслуживания сессий  $R_1$  и  $R_2$ . Пусть пороги на время ожидания начала обслуживания сессий распределены по экспоненциальному закону с параметрами  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , а поток сигналов контроллера является пуассоновским с интенсивностью  $\delta$ . Функционирование системы описывает случайный процесс (СП)  $X(t)$  с



состояниями вида  $\mathbf{x} = (m_1, m_2, n_1, n_2, r_1, r_2)$ , где  $m_k$  порог на максимальное число обслуживаемых сессий  $k$ -класса,  $n_k$  число обслуживаемых сессий  $k$ -класса,  $r_k$  число ожидающих начала обслуживания сессий  $k$ -класса.

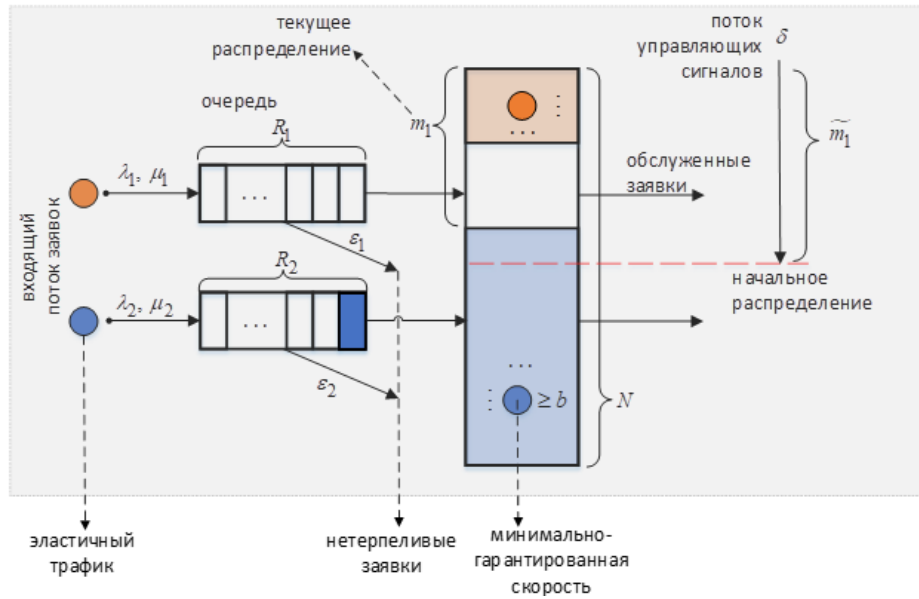


Рис. 2. Схема СМО для динамического перераспределения ресурса по сигналу

Далее в разделе 2.2 записана матрица интенсивностей переходов в блочном трехдиагональном виде для фиксированной стратегии выбора объема перераспределения ресурса, ориентированной на максимальное его использование (утв. 1), перераспределение ресурсов отражено в блоках главной диагонали.

**Утверждение 1.** В случае если на множестве  $\mathbf{X}(t)$  введен следующий лексикографический порядок

$$\begin{aligned} \mathbf{x}' = (m'_1, m'_2, n'_1, n'_2, r'_1, r'_2) > (m_1, m_2, n_1, n_2, r_1, r_2) = \mathbf{x} \Leftrightarrow \\ n'_1 + n'_2 + r'_1 + r'_2 > n_1 + n_2 + r_1 + r_2, \\ n'_1 + n'_2 + r'_1 + r'_2 = n_1 + n_2 + r_1 + r_2, \quad m'_1 > m_1, \\ n'_1 + n'_2 + r'_1 + r'_2 = n_1 + n_2 + r_1 + r_2, \quad m'_1 = m_1, \quad n'_1 + r'_1 > n_1 + r_1, \end{aligned} \quad (1)$$

то матрица интенсивностей переходов СП  $\mathbf{X}(t)$  представима в блочном трехдиагональном виде

$$\begin{aligned} \Lambda = \text{diag}(\Lambda_{00}, \Lambda_{01}, \dots, \Lambda_{0, N+R_1+R_2}) + \text{diag}^+(\Lambda_{11}, \Lambda_{12}, \dots, \Lambda_{1, N+R_1+R_2}) + \\ + \text{diag}^-(\Lambda_{21}, \Lambda_{22}, \dots, \Lambda_{2, N+R_1+R_2}), \end{aligned} \quad (2)$$

размерности

$$\begin{aligned} \dim(\Lambda) = \sum_{a=0}^{N+R_1+R_2} \sum_{m_1=0}^N (\min(a, b) - \max(0, a + b - N - R_1 - R_2) + 1) \times \\ \sum_{a=0}^{N+R_1+R_2} \sum_{m_1=0}^N (\min(a, b) - \max(0, a + b - N - R_1 - R_2) + 1) \end{aligned} \quad (3)$$

с ненулевыми положительными элементами, вычисляемыми по формулам

$$\Lambda_{0a}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \begin{cases} \delta, & m'_1 = m_1 + r_1, m'_2 = m_2 - r_1, n'_1 = m_1 + r_1, n'_2 = n_2, r'_1 = r_1 = 0, r'_2 = r_2 = 0, \\ & n_1 = m_1, r_1 \leq m_2 - n_2, \text{ или} \\ & m'_1 = m_1 + m_2 - n_2, m'_2 = n_2, n'_1 = m_1 + m_2 - n_2, n'_2 = n_2, r'_1 = r_1 - m_2 + n_2, \\ & r'_2 = r_2 = 0, n_1 = m_1, r_1 > m_2 - n_2, \text{ или} \\ & m'_1 = m_1 - r, m'_2 = m_2 + r_2, n'_1 = n_1, n'_2 = m_2 + r_2, r'_1 = r_1 = 0, r'_2 = r_2 = 0, \\ & n_2 = m_2, r_2 \leq m_1 - n_1, \text{ или} \\ & m'_1 = n_1, m'_2 = m_2 + m_1 - n_1, n'_1 = n_1, n'_2 = m_2 + m_1 - n_1, r'_1 = r_1 = 0, \\ & r'_2 = r_2 - m_1 + n_1, n_2 = m_2, r_2 > m_1 - n_1. \end{cases} \quad (4)$$

$$\Lambda_{1a}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \begin{cases} \lambda_1, & m'_1 = m_1, m'_2 = m_2, n'_1 = n_1 + 1, n'_2 = n_2, r'_1 = r_1 = 0, r'_2 = r_2, n_1 + 1 \leq m_1, \text{ или} \\ & m'_1 = m_1, m'_2 = m_2, n'_1 = m_1, n'_2 = n_2, r'_1 = r_1 + 1, r'_2 = r_2, n_1 + 1 > m_1, \\ \lambda_2, & m'_1 = m_1, m'_2 = m_2, n'_1 = n_1, n'_2 = n_2 + 1, r'_1 = r_1, r'_2 = r_2 = 0, n_2 + 1 \leq m_2, \text{ или} \\ & m'_1 = m_1, m'_2 = m_2, n'_1 = n_1, n'_2 = m_2, r'_1 = r_1, r'_2 = r_2 + 1, n_2 + 1 > m_2. \end{cases} \quad (5)$$

$$\Lambda_{2a}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \begin{cases} \frac{m_1}{N} V \mu_1, & m'_1 = m_1, m'_2 = m_2, n'_1 = m_1, n'_2 = n_2, r'_1 = r_1 - 1, r'_2 = r_2, \text{ или} \\ & m'_1 = m_1, m'_2 = m_2, n'_1 = n_1 - 1, n'_2 = n_2, r'_1 = r_1 = 0, r'_2 = r_2, \\ \frac{m_1}{N} V \mu_2, & m'_1 = m_1, m'_2 = m_2, n'_1 = n_1, n'_2 = m_2, r'_1 = r_1, r'_2 = r_2 - 1, \text{ или} \\ & m'_1 = m_1, m'_2 = m_2, n'_1 = n_1, n'_2 = n_2 - 1, r'_1 = r_1, r'_2 = r_2 = 0, \\ r_1 \varepsilon_1, & m'_1 = m_1, m'_2 = m_2, n'_1 = m_1, n'_2 = n_2, r'_1 = r_1 - 1, r'_2 = r_2, \\ r_2 \varepsilon_2, & m'_1 = m_1, m'_2 = m_2, n'_1 = n_1, n'_2 = m_2, r'_1 = r_1, r'_2 = r_2 - 1. \end{cases} \quad (6)$$

При таком виде матрицы интенсивностей переходов в разделе 2.3 получен рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения (лемма 1) линейными преобразованиями системы уравнения равновесия.

**Лемма 1.** Стационарные вероятности состояний модели с управляемым по сигналам перераспределением ресурса вычисляются в матричном виде по формуле

$$\boldsymbol{\pi}_k = \boldsymbol{\pi}_{N+R_1+R_2} \prod_{i=1}^{N+R_1+R_2-k} \mathbf{M}_{N+R_1+R_2-i}, \quad k = \overline{0, N+R_1+R_2-1}, \quad (7)$$

где вектор  $\boldsymbol{\pi}_{N+R_1+R_2}$  является единственным решением системы уравнений

$$\begin{cases} \boldsymbol{\pi}_{N+R_1+R_2} \left( \sum_{k=0}^{N+R_1+R_2-1} \prod_{i=1}^{N+R_1+R_2-k} \mathbf{M}_{N+R_1+R_2-i} \right) \mathbf{e}^T = 1, \\ \boldsymbol{\pi}_{N+R_1+R_2} \left( \mathbf{M}_{N+R_1+R_2-1} \cdot \boldsymbol{\Lambda}_{1, N+R_1+R_2} + \boldsymbol{\Lambda}_{0, N+R_1+R_2} \right) = \mathbf{0}, \end{cases} \quad (8)$$

а матрицы  $\mathbf{M}_k$  вычисляются по рекуррентным соотношениям

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_0 &= -\Lambda_{21} \cdot \Lambda_{00}^{-1}, \\ \mathbf{M}_k &= -\Lambda_{2,k+1} \cdot (\mathbf{M}_{k-1} \cdot \Lambda_{1k} + \Lambda_{0k})^{-1}, k = \overline{1, N + R_1 + R_2 - 1}, \\ \mathbf{M}_{N+R_1+R_2} &= \left( \mathbf{M}_{N+R_1+R_2-1} \cdot \Lambda_{1,N+R_1+R_2} + \Lambda_{0,N+R_1+R_2} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Решение задачи выбора частоты поступления сигналов контроллера требует определения показателей, влияющих на пропускную способность сети. Раздел 2.4 содержит показатели эффективности нарезки сети, которые соответствуют предложенным принципам оценки эффективности управления ресурсами: (а) насколько сильно происходит отклонение от начального распределения ресурса, т.е. число сессий, которые могли бы обслуживаться, но ожидают; (б) насколько часты случаи, когда при поступлении сигнала перераспределения ресурса не происходит; (в) насколько много простаивает свободного ресурса при ожидающих в это время сессиях.

Для сценария предоставления услуг групповой передачи данных и просмотра веб-страниц в разделе 2.5 осуществляется анализ выбора частоты поступления сигналов контроллера  $\delta$  с учетом ограничений на коэффициенты, соответствующие выбранным принципам эффективности нарезки сети: (б)

$$\beta = \sum_{x \in \mathcal{B}} \pi(m_1, m_2, n_1, n_2, r_1, r_2), \mathcal{B} = \left\{ \begin{aligned} x \in \mathcal{X} : n_1 = m_1, n_2 < m_2, r_1 > 0, r_2 = 0, \\ n_2 = m_2, n_1 < m_1, r_2 > 0, r_1 = 0. \end{aligned} \right\} \text{ и (в), а также}$$

вероятности блокировки запроса  $B_k$ . При разных ограничениях на вероятности блокировки (правая граница интервалов на рисунке) или доли результативных сигналов (левая граница интервалов) осуществляется выбор частоты поступления сигналов, который будет меняться в зависимости от целевой функции (рис. 3).

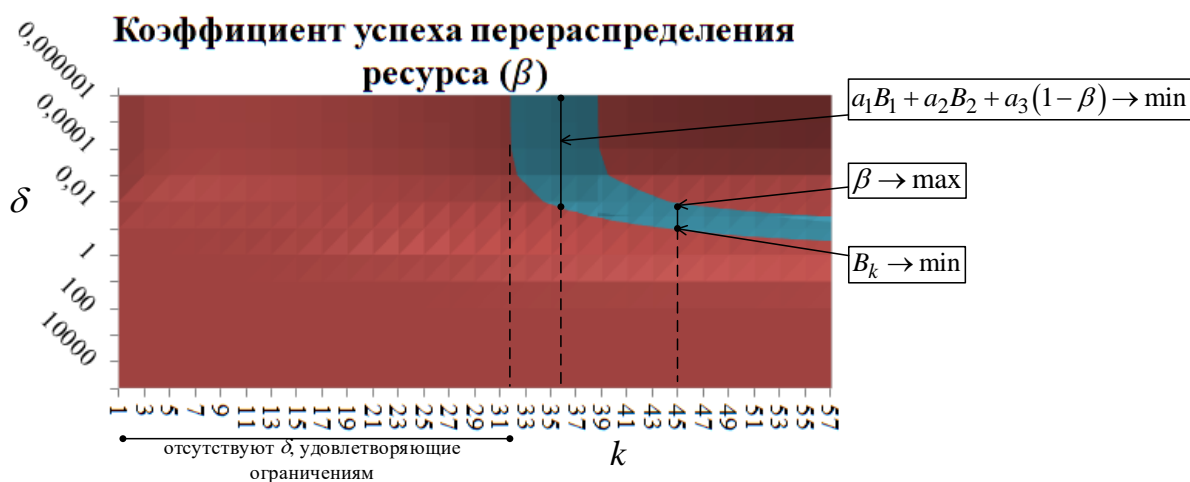


Рис. 3. Выбор частоты поступления сигналов  $\delta$  при  $B_2 \leq 0,003, B_1 \leq 0,004, \beta \leq 0,1$

В третьей главе представлена более гибкая модель, позволяющая осуществлять выбор нового объема ресурса при динамической нарезке сети, в которой для каждого состояния системы может быть задана своя стратегия выбора объема ресурсов, учитывая не только максимальное занятие всех имеющихся ресурсов, но и соответствие начальному распределению и долю результативных сигналов, что соответствует принципам эффективной нарезки ресурсов (а)-(в). Под стратегией управления понимается выбор нового объема ресурса для 1-го виртуального оператора при поступлении сигнала контроллера.

В разделе 3.1 строится управляемая система массового обслуживания для двух сегментов сети, определяется множество допустимых стратегий выбора нового объема ресурса. Далее в разделе 3.2 задан марковский процесс принятия решений в непрерывном времени  $(\mathcal{S}, \mathcal{A}_s, Q_a(s, s'), R(s))$ , где  $\mathcal{S}$  пространство состояний системы;  $\mathcal{A}_s$  множество допустимых стратегий управления в состоянии  $s = (m_1, l_1, l_2)$ ,  $s \in \mathcal{S}$ ,  $l_k = n_k + r_k$ , которое зависит от соотношений между числом сессий, ожидающих начала обслуживания, и числом сессий, уже находящихся на обслуживании (утв. 2);  $Q_a(s, s')$  матрица интенсивностей переходов;  $R(s)$  функция вознаграждения. Вид функции вознаграждения представлен в виде утверждения 3, три слагаемых которой соответствуют трем принципам эффективности нарезки ресурсов (а)-(в).

Разобьем пространство состояний  $\mathcal{S}$  на подмножества в зависимости от соотношений между числом обслуживаемых и ожидающих сессий. Обозначим  $\mathcal{S}_\delta$  множество состояний, в которых при поступлении сигнала произойдет перераспределение ресурса, и  $\overline{\mathcal{S}_\delta}$  множество, где перераспределения не произойдет,  $\mathcal{S} = \mathcal{S}_\delta \cup \overline{\mathcal{S}_\delta}$ . Подмножество состояний с  $m_1$  числом приборов 1-класса будет  $\mathcal{S} = \bigcup_{m_1=0}^N \mathcal{S}(m_1)$ ,  $\mathcal{S}(m_1) = \{(i, l_1, l_2) \in \mathcal{S} : i = m_1\}$ . В свою очередь  $\mathcal{S}_\delta(m_1) = \mathcal{S}_\delta^1(m_1) \cup \mathcal{S}_\delta^2(m_1)$ , где  $\mathcal{S}_\delta^1(m_1) = \{(i, l_1, l_2) \in \mathcal{S}(m_1) : l_1 > m_1, l_2 < N - m_1\}$  состояния, в которых при поступлении сигнала будут увеличены ресурсы 1-класса трафика, а  $\mathcal{S}_\delta^2(m_1) = \{(i, l_1, l_2) \in \mathcal{S}(m_1) : l_1 < m_1, l_2 > N - m_1\}$  увеличены ресурсы 2-класса. Следовательно, в случае наличия необходимого числа свободных ресурсов для обслуживания ожидающих сессий, увеличение сегментов осуществляется на число ожидающих сессий  $\mathcal{S}_\delta^k(m_1) = \mathcal{S}_\delta^{k1}(m_1) \cup \mathcal{S}_\delta^{k2}(m_1)$ ,  $\mathcal{S}_\delta^{k1}(m_1) = \{(i, l_1, l_2) \in \mathcal{S}_\delta^k(m_1) : l_1 + l_2 \leq N\}$  или на все свободные ресурсы  $\mathcal{S}_\delta^{k2}(m_1) = \{(i, l_1, l_2) \in \mathcal{S}_\delta^k(m_1) : l_1 + l_2 > N\}$ .

**Утверждение 2.** Множество допустимых стратегий  $\mathcal{A}_s \subseteq \mathcal{A}$  в состоянии  $s = (m_1, l_1, l_2)$ ,  $s \in \mathcal{S}$ , когда имеются свободные ресурсы  $\{l_1 < m_1\} \cup \{l_2 < N - m_1\}$ , определяется в виде

$$\mathcal{A}_s = \begin{cases} \{m_1, \dots, l_1\}, & s \in \mathcal{S}_\delta^{11}(m_1), \\ \{m_1, \dots, N - l_2\}, & s \in \mathcal{S}_\delta^{12}(m_1), \\ \{N - l_2, \dots, m_1\}, & s \in \mathcal{S}_\delta^{21}(m_1), \\ \{l_1, \dots, m_1\}, & s \in \mathcal{S}_\delta^{22}(m_1), \\ \emptyset, & s \notin \mathcal{S}_\delta(m_1). \end{cases} \quad (10)$$

**Утверждение 3.** Функция вознаграждения, получаемого в единицу времени в течение пребывания в системе в состоянии  $s \in \mathcal{S}$ , вычисляется по формуле

$$R(s) = - \left( c_1 \cdot \chi(s) \cdot 1\{s \in \overline{\mathcal{S}}_\delta^1(m_1)\} \cdot \left[ 1\{m_1 < N/2, s \in \mathcal{S}_\delta^1(m_1)\} + 1\{m_1 > N/2, s \in \mathcal{S}_\delta^2(m_1)\} \right] + c_2 \cdot \beta_\delta(s) \cdot 1\{s \in \overline{\mathcal{S}}_\delta\} + c_3 \cdot \gamma(s) \cdot 1\{s \in \mathcal{S}_\delta\} \right), \quad (11)$$

где коэффициент  $\chi(s)$  соответствует принципу равного начального разделения ресурса,  $\beta_\delta(s)$  – принципу результативности перераспределения ресурса и  $\gamma(s)$  – использованию ресурса, а  $c_1, c_2, c_3$  соответствующие веса:

$$\chi(s) = \begin{cases} N/2 - m_1, & s : m_1 < N/2, l_1 > m_1, l_1 - m_1 > N/2 - m_1, \\ l_1 - m_1, & s : m_1 < N/2, l_1 > m_1, l_1 - m_1 \leq N/2 - m_1, \\ N/2 - N + m_1, & s : m_1 > N/2, l_2 > N - m_1, l_2 - N + m_1 > N/2 - N + m_1, \\ l_2 - N + m_1, & s : m_1 > N/2, l_2 > N - m_1, l_2 - N + m_1 \leq N/2 - N + m_1, \end{cases} \quad (12)$$

$$\beta_\delta(s) = \delta \left( \delta + \lambda_1 \cdot 1\{l_1 + 1 \leq R_1 + m_1\} + \lambda_2 \cdot 1\{l_2 + 1 \leq R_2 + N - m_1\} + \frac{m_1}{N} V \mu_1 \cdot 1\{m_1 > 0, l_1 > 0\} + \frac{N - m_1}{N} V \mu_2 \cdot 1\{N - m_1 > 0, l_2 > 0\} + (l_1 - m_1) \varepsilon_1 \cdot 1\{l_1 > m_1\} + (l_2 - N + m_1) \varepsilon_2 \cdot 1\{l_2 > N - m_1\} \right)^{-1}, \quad (13)$$

$$\gamma(s) = \begin{cases} N - m_1 - l_2, & s \in \mathcal{S}_\delta^{12}(m_1), \\ l_1 - m_1, & s \in \mathcal{S}_\delta^{11}(m_1), \\ m_1 - l_1, & s \in \mathcal{S}_\delta^{22}(m_1), \\ l_2 - N + m_1, & s \in \mathcal{S}_\delta^{21}(m_1). \end{cases} \quad (14)$$

Функция среднего вознаграждения при стационарном распределении определяется леммой 2. Задачей оптимизации является поиск оптимальной стратегии, при которой  $g^* = \max_a (g^a)$ .

**Лемма 2.** Функция среднего вознаграждения, получаемого в единицу времени вычисляется по формуле

$$g^a = \sum_{s \in \mathcal{S}} R(s) \pi^a(s), \quad (15)$$

где  $\pi^a(s)$  стационарное вероятностное распределение, что процесс находится в состоянии  $s$  при стратегии  $a$ .

Для каждого состояния существует свой набор допустимых стратегий, задача поиска оптимальной стратегии становится сложной для вычислений. Применение итерационного метода Р. Ховарда для решения системы уравнений относительно функций среднего вознаграждения показано в разделе 3.3. Получен вид целевой функции для улучшения стратегии управления перераспределением ресурса. Итерационный алгоритм позволяет вычислить оптимальную политику за невысокое число итераций, каждая из которых представляет собой определение оценок (вознаграждение, получаемое в единицу времени в некотором состоянии при заданной стратегии управления) и улучшение стратегии. Первая часть определена в утверждении 4, где приведена система линейных алгебраических уравнений, аналогично СУР раздела 2.3, но уже относительно оценок для применения итерационного метода. Вторая часть определена в утверждении 5.

**Утверждение 4.** Система уравнений относительно функции среднего вознаграждения  $g^a$  и оценок  $v_a(s), s \in \mathcal{S}$  для итерационного метода решения задается как

$$v_a(s) = \frac{1}{\sum_{s' \in \mathcal{S} \setminus s} q_{a(s)}(s, s')} \left[ R(s) + \sum_{s' \in \mathcal{S} \setminus s} q_{a(s)}(s, s') v_a(s') - g^a \right], s \in \mathcal{S}, \quad (16)$$

где  $q_{a(s)}(s, s'), s, s' \in \mathcal{S}$  элемент матрицы интенсивностей переходов, а  $R(s)$  функция вознаграждения, заданная утверждением 3.

Решая систему линейных уравнений, положив на нулевой итерации значения  $v_a^{[0]}(s)$  равными нулю, находятся оценки и среднее вознаграждение. Далее, используя полученные оценки, находится стратегия, которая приводит систему к большему вознаграждению, чем начальная. Следовательно, для того чтобы принять решение в состоянии  $s \in \mathcal{S}$  достаточно максимизировать выражение в утверждении 5.

**Утверждение 5.** Целевая функция для улучшения стратегии управления вычисляется по формуле

$$a(s) = \arg \max_{a \in \mathcal{A}_s} \{v_a(a, l_1, l_2)\}, s \in \mathcal{S}, \quad (17)$$

где  $\mathcal{A}_s, s \in \mathcal{S}$  множество допустимых стратегий, определенное в утверждении 2.

Далее две процедуры определения оценок и улучшения стратегии объединяются в итерационный алгоритм 1, с помощью которого находится оптимальная стратегия среди всех возможных стратегий, которая дает наибольшее вознаграждение.

**Алгоритм 1.** Итерационный алгоритм вычисления оптимальной стратегии перераспределения ресурса задается как

- 
- 1:  $n \leftarrow 0$
  - 2:  $v_a^{[0]}(s) = 0, s \in \mathcal{S}$
  - 3:  $a^{[0]}(s) = \begin{cases} l_1 & s \in \mathcal{S}_\delta^{11} \\ N - l_2 & s \in \mathcal{S}_\delta^{12} \\ m_1 - l_2 - N + m_1 & s \in \mathcal{S}_\delta^{21} \\ l_1 & s \in \mathcal{S}_\delta^{22} \end{cases} \triangleright \text{начальная стратегия}$
  - 4: **решить** (система (16))  $\triangleright$  утв.4
  - 5:  $a^{[n+1]}(s) = (\text{по формуле (17)}) \triangleright$  улучшение стратегии (утв.5)
  - 6: **если**  $a^{[n+1]}(s) = a^{[n]}(s), s \in \mathcal{S}$  **то**
  - 7: **вернуть**  $a^{[n+1]}(s), v_a^{[n]}(s), g^{a^{[n]}}$
  - 8: **иначе**  $n \leftarrow n + 1$ , **к шагу 5**
- 

В разделе 3.4 представлено дискретно-событийное моделирование системы с произвольным числом сегментов и формализована задача максимизации показателей эффективности нарезки ресурсов со стороны базового оператора. Алгоритм перераспределения ресурса ориентирован на равномерное занятие свободных ресурсов и выбор сегмента с большим числом ожидающих начала обслуживания сессий из  $K$  возможных сегментов (аналогичен тому, который использовался в модели главы 2). Принципы эффективности нарезки ресурсов (а)-(в) отражены в рассчитываемых показателях эффективности.

Коэффициент  $\alpha \in [0, 1]$  соответствия начальному распределению ресурса, т.е. доля времени, когда текущее планирование ресурсов не хуже, чем начальное распределение, вычисляется по формуле

$$\alpha = \frac{1}{K} \sum_{k \in \mathcal{K}} a_k, a_k = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{l=1}^{L(T)} ((t_l - t_{l-1}) \cdot \min(N_k(t_l), N_k(t_0)))}{T \cdot N_k(t_0)}, \quad (18)$$

где  $N_k(t_l)$  распределение ресурса  $k$ -сегмента в некоторый момент времени  $t_l$ ,  $L(T)$  общее число поступлений сигналов за время  $T$ .

Коэффициент  $\beta \in [0,1]$  результативности перераспределения ресурса, т.е. доля числа поступлений сигналов, после которых произошло перераспределение ресурсов, вычисляется по формуле

$$\beta = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{l=1}^{L(T)} \max_{k \in \mathcal{K}} \{N_k(t_l) \neq N_k(t_l - 0)\}}{L(T) + 1}. \quad (19)$$

Коэффициент  $\gamma \in [0,1]$  использования ресурса, т.е. доля времени, когда все ресурсы заняты, вычисляется по формуле

$$\gamma = \frac{1}{K} \sum_{k \in \mathcal{K}} \gamma_k, \gamma_k = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^{I(T)} (t_i - \tau_i)}{T}, \quad (20)$$

где  $\tau_i$  и  $t_i$  начало и конец интервала занятости ресурса, а  $I(T)$  номер этого интервала. Тогда задача выбора частоты поступления сигналов контроллера  $\delta$  записывается в виде  $\alpha(\delta) + \beta(\delta) + \gamma(\delta) \rightarrow \max$ .

Анализ показателей эффективности нарезки ресурсов для нескольких сегментов содержится в разделе 3.5. Динамическое перераспределение ресурса для пяти сегментов при заданных исходных данных, полученное с помощью построенной имитационной модели, отражено на рисунке 5, где наблюдаются значительные скачки в сегментах с более высокой интенсивностью поступления запросов.

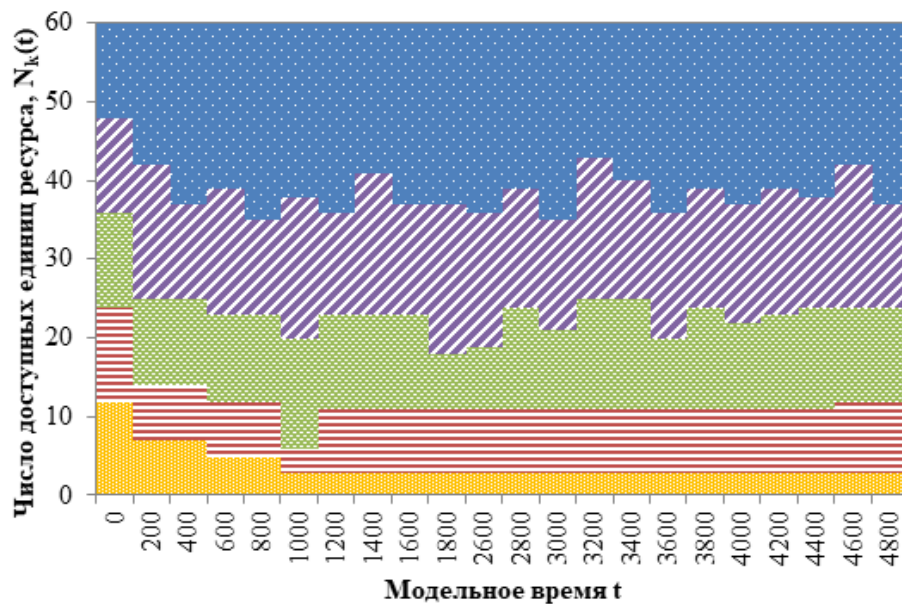


Рис. 5. Динамическое перераспределение ресурса при  $\delta^{-1} = 200$  мс  
**В заключении** представлены основные результаты диссертационной работы.



## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В заключении диссертационной работы сформулируем основные результаты и выводы полученных результатов по сравнению с результатами других исследований.

1. Разработана модель динамической нарезки радиоресурсов сети пятого поколения между виртуальными операторами, передающими данные с минимальной скоростью в виде системы массового обслуживания с эластичным трафиком и сигналами, по которым происходит перераспределение ресурса. Ограничение пользователя на время ожидания начала обслуживания моделируется нетерпеливыми заявками. Для фиксированной стратегии выбора объема перераспределения ресурса, ориентированной на максимальное его использование, матрица интенсивностей переходов записана в блочном трехдиагональном виде. Получен матричный рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения вероятностей.
2. Модель нарезки сети со стратегией управления выбором объема перераспределения ресурса разработана в виде управляемой системы массового обслуживания. Функция вознаграждения отражает простой ресурса, отклонение распределения ресурса от значений в соглашении о качестве обслуживания, вероятность перераспределения ресурса по сигналу. Система уравнений относительно функций среднего вознаграждения и оценок записана в виде для итерационного метода решения. Получен вид целевой функции для улучшения стратегии управления. Применен итерационный алгоритм вычисления оптимальной стратегии.
3. Проведено дискретно-событийное моделирование системы с произвольным числом сегментов сети с алгоритмом перераспределения ресурса, ориентированном на равномерное занятие простаивающих ресурсов и выбором сегментов с большим числом ожидающих начала обслуживания пользователей. Формализована задача максимизации показателей эффективности нарезки ресурсов со стороны базового оператора – взвешенных коэффициентов использования ресурса и соответствия распределения ресурса соглашению о качестве обслуживания, вероятности перераспределения ресурса по сигналу по частоте поступления сигналов. При ее выборе учитываются также ограничения на вероятности блокировки запросов на передачу эластичного трафика виртуальных операторов.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. *Vlaskina A., Polyakov N., Gudkova I.* Modeling and performance analysis of elastic traffic with minimum rate guarantee transmission under network slicing // *Lecture Notes in Computer Science*, 2019, 11660, pp. 621–634.
2. *Vlaskina A.S., Polyakov N.A., Gudkova I.A., Gaidamaka Yu.V.* Performance analysis of elastic traffic with minimum bit rate guarantee transmission in wireless network under network slicing // *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2020, 20(3), pp. 378–387.
3. *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, 12525, pp. 71–85.
4. *Kochetkova I.A., Vlaskina A.S., Vu N.N., Shorgin V.S.* Queuing system with signals for dynamic resource allocation for analyzing network slicing in 5G networks // *Informatika i ee Primeneniya*, 2021, 15(3), pp. 91–97.
5. *Vlaskina A.S., Burtseva S.A., Kochetkova I.A., Shorgin S.Ya.* Controllable queuing system with elastic traffic and signals for analyzing network slicing // *Informatika i ee Primeneniya*, 2022, 16(3), pp. 90–96.

### *Работы в изданиях, входящих в Перечень ВАК*

6. *Kochetkova I.A., Vlaskina A.S., Efrosinin D.V., Khakimov A.A., Burtseva S.A.* To analysis of a two-buffer queuing system with cross-type service and additional penalties // *Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science*. 2021. Т. 29. № 2. С. 158–172.

### *Патенты*

7. *Поляков Н.А., Власкина А.С., Гудкова И.А., Самуйлов К.Е.* Расчет вероятностно-временных характеристик обслуживания эластичного трафика с минимальной скоростью в сегменте беспроводной сети с нарезкой радиоресурсов (имитационная модель) // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2019664614, 11.11.2019.
8. *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 регистрации программы для ЭВМ 2022660727, 08.06.2022..

### *Конференции*

9. *Власкина А.С.* Управляемая система массового обслуживания для анализа динамической нарезки радиоресурсов в сети 5G // В сборнике: Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, 2022. С. 34–38.
10. *Леонтьева К.А., Гебриал И.Е.З., Бурдина К.П., Бурцева С.А., Власкина А.С.* К анализу политики перераспределения ресурса в управляемой системе массового обслуживания для нарезки сети 5G // В сборнике: Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, 2023. С. 82–86.

**Власкина Анастасия Сергеевна (Россия)**

**МОДЕЛИ С ЭЛАСТИЧНЫМ ТРАФИКОМ И СИГНАЛАМИ ДЛЯ  
РАСЧЁТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАРЕЗКИ  
СЕТЕВЫХ РЕСУРСОВ**

В диссертации разработаны модели нарезки радиоресурсов беспроводной сети между виртуальными операторами, передающими данные с минимальной скоростью и ограничением на время ожидания начала обслуживания. Нарезка ресурсов происходит динамически по сигналам контроллера, при поступлении которых задаются новые объемы ресурсов для виртуальных операторов. Для анализа фиксированной политики перераспределения ресурса, ориентированной на максимальное его использование, построена система массового обслуживания с нетерпеливым эластичным трафиком, получен матричный рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения вероятностей. Для анализа политики управления выбором объема перераспределения ресурса, учитывающей также отклонение распределения ресурса от значений в соглашении о качестве обслуживания и вероятность перераспределения ресурса по сигналу, разработана управляемая система массового обслуживания, для которой получена функция среднего вознаграждения. Проведено дискретно-событийное моделирование системы и численно решена задача максимизации показателей эффективности нарезки ресурсов по частоте поступления сигналов.

**Vlaskina Anastasiia (Russia)**

The thesis is focused on novel models for optimizing the allocation of radio resources in wireless networks among virtual operators who transmit data with minimal bit rates and have a limit on waiting time for service initiation. The resource allocation is dynamic and occurs based on controller signals that set new resource volumes for virtual operators. To analyze the fixed resource reallocation policy aimed at maximizing its usage, a queuing system with impatient elastic traffic was constructed, and a matrix recursive algorithm was developed to calculate the stationary probability distribution. Additionally, to analyze a policy for controlling the choice of resource reallocation volume that considers deviations from values specified in the service level agreement and the probability of resource reallocation based on signals, a controllable queuing system was developed, and the average-reward function was obtained. The study conducted a discrete-event simulation of the system and numerically solved the problem of maximizing resource allocation efficiency indicators based on signal rate.