

На правах рукописи

Платонова Анна Алексеевна

**ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА
ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СЕТИ ИНТЕГРИРОВАННОГО ДОСТУПА И ТРАНЗИТА
С РАЗДЕЛЕНИЕМ РЕСУРСОВ**

1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

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

Научный руководитель: **Гайдамака Юлия Васильевна**
доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теории вероятностей и кибербезопасности ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Официальные оппоненты: **Парамонов Александр Иванович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сетей связи и передачи данных ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

Моисеева Светлана Петровна
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теории вероятностей и математической статистики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Степанов Михаил Сергеевич
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры интеллектуальных сетевых и облачных технологий ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики»

Защита диссертации состоится 19 июня 2026 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета ПДС 0200.006 при Российском университете дружбы народов имени Патриса Лумумбы по адресу: г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, ауд. 208.

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 «___» _____ 2026 г.

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



М.Н. Геворкян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные сети пятого поколения (5G) и перспективные беспроводные сети сталкиваются с беспрецедентными вызовами, связанными с экспоненциальным ростом числа подключенных устройств, разнообразием сервисов и ужесточением требований к ключевым показателям качества обслуживания (Quality of Service, QoS). В частности, для критически важных приложений, таких как промышленный Интернет вещей, телемедицина и автономный транспорт, необходимы сверхнизкие задержки, высокая надежность и актуальность передаваемой информации. Для удовлетворения этих зачастую противоречивых требований требуются инновационные подходы к управлению сетевыми ресурсами.

В этом контексте технология нарезки сети (Network Slicing) в сетях радиодоступа 5G является фундаментальным механизмом, позволяющим эффективно использовать единую физическую инфраструктуру для организации специализированных логических сетей (кратко, слайсов) с гарантированными показателями производительности. При этом эффективное управление динамическим выделением ресурсов, обеспечение строгой изоляции слайсов и оптимизация производительности в условиях постоянно меняющейся абонентской нагрузки остаются сложными задачами, требующими глубокого теоретического анализа и разработки новых методов.

Параллельно с технологией нарезки сети для развертывания 5G/6G в миллиметровом (mmWave) и суб-терагерцевом (sub-THz) диапазонах, характеризующихся высоким затуханием сигнала и критической чувствительностью к блокировке прямой видимости между приемо-передающими устройствами, активно внедряются многошаговые беспроводные сети интегрированного доступа и транзита (Integrated Access and Backhaul, IAB). Эти сети используют беспроводные ретрансляторы для создания гибкой транспортной инфраструктуры. Однако многошаговая передача и характерный для сетей интегрированного доступа и транзита полудуплексный режим передачи данных неизбежно приводят к увеличению сквозной задержки пакетов и влияют на актуальность передаваемой информации. Таким образом, разработка моделей и методов оптимизации распределения ресурсов для минимизации сквозной задержки и возраста информации (Age of Information, AoI) с учетом специфических ограничений сетей интегрированного доступа и транзита, является крайне актуальной научной и практической задачей.

Степень разработанности темы. Исследования в области нарезки сети 5G традиционно направленные на оптимальное использование ресурсов, справедливое их распределение между слайсами и поддержание надежной изоляции, в области сетей интегрированного доступа и транзита посвящены вопросам пропускной способности, надежности, маршрутизации и координации помех. Многие из этих работ ориентированы на полнодуплексные режимы передачи, что упрощает управление ресурсами, но не отражает реальные ограничения полудуплексных систем, особенно в mmWave и sub-THz диапазонах. Комплексный анализ и оптимизация сквозной задержки и, в особенности, возраста информации в условиях полудуплексных многошаговых сетей интегрированного доступа и транзита остаются недостаточно изученными. Таким образом, существует явный пробел в исследованиях, касающихся минимизации задержки и анализа возраста информации в таких системах.

Для исследования показателей эффективности многошаговых сетей интегрированного доступа и транзита построены математические модели, основанные на теории вероятностей, теории марковских случайных процессов (СП), теории массового обслуживания, теории телетрафика и стохастической геометрии. К российским и зарубежным ученым, исследователям, внесшим большой вклад в эти области и практическое применение результатов к анализу сетей связи, относятся Башарин Г.П., Вишневецкий В.М., Гайдамака Ю.В., Ивницкий В.А., Кучерявый А.Е., Кучерявый Е.А., Молчанов Д.А., Моисеева С.П., Наумов В.А., Парамонов А.И., Пшеничников А.П., Самуйлов К.Е., Семенова О.В., Степанов М.С., Степанов С.Н., Толмачев А.Л., Цитович И.И., Яркина Н.В., Correia L.M., Naenggi M., Jornet J.M., Goldsmith A., Poor H.V.

Целью диссертационной работы является анализ и расчет показателей качества предоставления услуг в сети интегрированного доступа и транзита с разделением ресурсов с использованием марковских моделей систем массового обслуживания.

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

1. Разработка метода разделения ресурсов беспроводной сети при динамическом выделении ресурса на основе максиминной справедливости в условиях приоритизации слайсов.
2. Построение математической модели слайса в виде системы массового обслуживания с дисциплиной разделения процессора и эластичным трафиком с ограничением на максимальную скорость передачи, позволяющей провести

сравнительный анализ влияния методов вызова процедуры нарезки по показателям эффективности – вероятности деградации обслуживания, коэффициенту использования ресурса и частоты вызова процедуры нарезки.

3. Разработка алгоритма расчета оптимальных долей времени активности каналов сети интегрированного доступа и транзита с разделением ресурсов по времени, минимизирующих среднюю сквозную задержку. Вычисление правостороннего квантиля заданного уровня пикового возраста информации на маршруте, а также получение в явном виде функции распределения сквозной задержки с помощью распределения фазового типа.

Научная новизна диссертационной работы.

1. Разработан метод разделения ресурсов между слайсами сети при динамическом выделении ресурса на основе максиминной справедливости с учетом приоритизации слайсов, который в отличие от известных предусматривает избыточное резервирование ресурсов типа «овербукинг».
2. Предложено понятие деградации обслуживания абонента в случае падения скорости передачи данных при предоставлении услуги абоненту ниже заданного порога, которое позволило получить аналитическое выражение для вероятности деградации обслуживания и сравнить показатели эффективности обслуживания абонентов для нескольких методов вызова процедуры нарезки ресурса.
3. Формализована и решена проблема минимизации средней по сети интегрированного доступа и транзита сквозной задержки и среднего пикового возраста информации, при этом в отличие от известных результатов показано, что случайная величина задержки на маршруте сети имеет функцию распределения фазового типа.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные в диссертационной работе результаты обладают существенной теоретической и практической значимостью. В теоретическом плане они развивают математический аппарат теории массового обслуживания и теории оптимизации, предлагая новые подходы к анализу управления ресурсами в современных и перспективных беспроводных сетях. Разработанные модели и выведенные аналитические выражения для таких показателей эффективности, как коэффициент использования ресурса, вероятность деградации обслуживания, сквозная задержка и возраст информации, расширяют теоретические основы для глубокого понимания поведения сложных сетевых систем с нарезкой ресурса и многошаговой передачей. Особый вклад вносится в исследование возраста информации за счет его анализа в контексте сетей интегрированного доступа и транзита с полудуплексными

ограничениями. Наряду с этим, работа имеет практическую ценность, выражающуюся в разработке конкретных моделей и алгоритмов, применимых для проектирования, планирования и оптимизации сетей 5G/6G. Предложенные стратегии нарезки ресурса и методы оптимизации долей времени активности каналов в сетях интегрированного доступа и транзита позволяют операторам связи эффективно управлять сетевыми ресурсами, гарантировать требуемое качество обслуживания для разнообразных услуг, минимизировать сквозные задержки и обеспечивать требования к свежести информации для критически важных приложений. Это способствует не только повышению производительности сети, но и снижению вычислительной сложности управления, поскольку алгоритмы разделения ресурсов Глав 1 и 3 могут быть интегрированы в систему управления радиоресурсами и в менеджер нарезки ресурса в реальных сетях.

Методы исследования. В диссертации применяются методы теории массового обслуживания, стохастического моделирования (пуассоновские процессы), теории оптимизации (линейное и нелинейное программирование, метод проекции градиента), имитационное моделирование с использованием дискретно-событийного имитатора OMNeT++ с расширенной библиотекой *queueinglib*, а также методы математического анализа и теории вероятностей.

Положения, выносимые на защиту.

1. Разработанная методика разделения ресурсов между слайсами сети при динамическом выделении ресурса на основе максиминной справедливости с учетом приоритизации слайсов позволяет получить оптимальные доли ресурса, выделяемые каждому слайсу, как решение проблемы оптимизации, учитывающей максимальное использование ресурса и ограничения на диапазон скоростей передачи данных при предоставлении услуги.
2. Динамическая нарезка ресурса при обнаружении деградации обслуживания, т.е. падения скорости передачи данных при предоставлении услуги абоненту ниже заданного порога, обеспечивает более высокие показатели эффективности обслуживания абонентов по сравнению с обслуживанием абонентов с статической нарезкой и другими методами вызова процедуры нарезки ресурса – при поступлении нового запроса, по окончании получения услуги абонентом в сети, при срабатывании регулярного таймера нарезки.
3. Разработанный алгоритм расчета оптимальных долей времени активности каналов сети интегрированного доступа и транзита с разделением ресурсов по времени позволяет минимизировать среднюю по сети сквозную задержку и средний по сети пиковый возраст информации, а также вычислять

правосторонний квантиль заданного уровня для функций распределения указанных случайных величин на маршруте от донора к абонентскому устройству в виде распределения фазового типа.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечивается использованием строгого математического аппарата теории массового обслуживания и теории оптимизации, корректностью применяемых допущений, а также верификацией аналитических моделей с помощью дискретно-событийного имитационного моделирования в среде OMNET++.

Основные результаты диссертации были апробированы на следующих научных конференциях:

- международная конференция «International Conference on Next Generation Wired/Wireless Advanced Networks and Systems» (г. Абу-Даби, Объединенные Арабские Эмираты, 2025);
- всероссийская конференция с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (г. Москва, РУДН, 2022, 2023, 2025);
- международная конференция «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications» (г. Москва, РУДН, 2022).

Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах Future Internet (Scopus Q2), Информатика и ее применения (Scopus Q3), Системы и средства информатики (список ВАК), а также в трудах международных конференций, индексируемых в Scopus – Lecture Notes in Computer Science (Scopus Q2), Communications in Computer and Information (Scopus Q3).

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы включены в исследования по грантам Российского научного фонда (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», № 24-19-00804 «Исследование возраста информации в задачах обеспечения качества предоставления услуг URLLC и mMTC в беспроводных сетях 5G», № 23-79-10084 «Математические модели и практические алгоритмы повышения энергоэффективности в гетерогенных миллиметровых и терагерцевых сетях пятого и шестого поколения (5G/6G)».

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 11 работах, в том числе в 5 изданиях, входящих в базу данных Scopus, в 1 издании из списка журналов, рекомендованного ВАК при Минобрнауки России, в 3 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **Главе 1** представлены предварительные исследования технологии нарезки ресурса в сетях радиодоступа 5G, для которой разработана методика разделения ресурса между слайсами для систем с нарезкой ресурса без приоритизации слайсов и с приоритизацией слайсов, а также сформулированы задачи диссертации. Раздел 1.1 посвящен общим принципам технологии нарезки радиоресурса, включая изоляцию слайсов и динамическое масштабирование ресурсов. В разделе 1.2 описана системная модель и архитектура нарезки сети радиодоступа 5G, а также математическая модель распределения ресурсов, учитывающая динамику абонентской нагрузки и ограничения на пропускную способность радиоканалов. Раздел 1.3 формулирует постановку задачи исследования, акцентируя внимание на вызовах, связанных с сетями интегрированного доступа и транзита и метриками сквозной задержки и возраста информации.

Основными результатами Главы 1 являются Алгоритм 1 численного решения задачи разделения ресурсов между S слайсами на основе максиминной справедливости для случая наличия ресурса, обеспечивающего всем абонентам сети как минимум самое низкое качество, указанное в соглашениях об уровне обслуживания, а также Теоремы 1 и 2 для случая недостатка ресурса с методикой разделения ресурсов между S слайсами для системы без приоритизации слайсов и с приоритизацией слайсов.

Алгоритм 1. Численное решение $\mathbf{R}^* = \underset{\mathbf{R}}{\operatorname{argmax}} U(\mathbf{R})$ оптимизационной задачи разделения ресурса C между слайсами из множества \mathcal{S} , $S = |\mathcal{S}|$, в системе с нарезкой ресурса в ограничениях на нижнее $\mathbf{R}^{\min} = (R_s^{\min})_{s \in \mathcal{S}}$ и верхнее \mathbf{R}^{\max} пороговые значения скорости передачи данных в каждом слайсе, а также на минимальное число \mathbf{N}^{cont} абонентов каждого слайса, которым услуга должна быть предоставлена на скорости не ниже \mathbf{R}^{\min} , для числа абонентов в каждом слайсе, заданного вектором \mathbf{N} ,

$$U(\mathbf{R}) = \sum_{s \in \mathcal{S}} W_s(N_s) N_s * \ln(R_s) \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\mathbf{N}^T \mathbf{R} = C, \quad (2)$$

$$\mathbf{R} \in \mathbb{R}_+^S: R_s^{\min} \leq R_s \leq R_s^{\max}, s \in \mathcal{S}, \quad (3)$$

вычисляется по следующему алгоритму.

- Входные параметры: $C, S, \mathbf{N}, \mathbf{R}^{\min}, \mathbf{R}^{\max}, \mathbf{N}^{\text{cont}}$
 Выходной параметр: \mathbf{R}
1. инициализация
 2. $\mathbf{W}^T := [W_1(N_1), \dots, W_S(N_S)]$ (вектор весовых функций)
 3. $\mathbf{X}^{\text{stat}} := \mathbf{W}C(\mathbf{W}\mathbf{N}^T)^{-1}$ // стационарная точка
 4. **if** $R_i^{\min} \leq X_i^{\text{stat}} \leq R_i^{\max}, i = 1, \dots, S$ **then**
 5. **return** \mathbf{X}^{stat}
 6. $\mathbf{M}_{[1 \times S]} := \mathbf{N}^T$
 7. $\mathbf{P}_{[S \times S]} := \mathbf{I} - \mathbf{N}^T \cdot (\mathbf{N}\mathbf{N}^T)^{-1} \cdot \mathbf{N}$
 8. $\mathbf{X}^0 := \mathbf{R}^{\min} + (C - \mathbf{N}^T \mathbf{R}^{\min}) (\mathbf{N}(\mathbf{R}^{\max} - \mathbf{R}^{\min})^T)^{-1} (\mathbf{R}^{\max} - \mathbf{R}^{\min})$
 9. $\tau := \|\mathbf{X}^0 - \mathbf{X}^{\text{stat}}\|, \delta := 1$
 10. **while** $\delta > 0.0001$ **do**
 11. $\mathbf{X}^1 := \mathbf{X}^0 + \tau \mathbf{P} \text{div}(\mathbf{N}^T \mathbf{W}, \mathbf{X}^0)$
 12. $t_{\text{bound}} := 2, t_{\text{coord}} := -1, \delta_+ := 0$
 13. **for** $i = \overline{1, S}$ **do**
 14. **if** $N_i > 0$ **then**
 15. **if** $X_i^1 < R_i^{\min}$ **then**
 16. **if** $t_{\text{bound}} > (R_i^{\min} - X_i^0)(X_i^1 - X_i^0)^{-1}$ **then**
 17. $t_{\text{bound}} := (R_i^{\min} - X_i^0)(X_i^1 - X_i^0)^{-1}, t_{\text{coord}} := i$
 18. **if** $X_i^1 > R_i^{\max}$ **then**
 19. **if** $t_{\text{bound}} > (R_i^{\max} - X_i^0)(X_i^1 - X_i^0)^{-1}$ **then**
 20. $t_{\text{bound}} := (R_i^{\max} - X_i^0)(X_i^1 - X_i^0)^{-1}, t_{\text{coord}} := i$
 21. **if** $i_{\text{bound}} < 2$ **then**
 22. $\mathbf{X}^1 := \mathbf{X}^0 + t_{\text{bound}}(\mathbf{X}^1 - \mathbf{X}^0)$
 23. **if** Число строк матрицы $\mathbf{M} < S - 1$ **then**
 24. Добавить пустую строку к \mathbf{M}
 25. $\delta_+ := 1$
 26. Последняя строка матрицы $\mathbf{M} := \mathbf{I}[t_{\text{coord}}]$
 27. **if** $\|\mathbf{M}\mathbf{M}^T\| > 0.0000001$ **then**
 28. $\mathbf{P} := \mathbf{I} - \mathbf{M}^T(\mathbf{M}\mathbf{M}^T)^{-1}\mathbf{M}$
 29. $\delta := \delta_+ + \|\mathbf{X}^0 - \mathbf{X}^1\|; \mathbf{X}^0 := \mathbf{X}^1$
 30. **return** \mathbf{X}^0

Пусть система с нарезкой ресурса между слайсами из множества $\mathcal{S}, S = |\mathcal{S}|$, задана следующими параметрами:

C – суммарный ресурс системы (емкость БС), *бум/с*; $\mathbf{R}^{\min} = (R_s^{\min})_{s \in \mathcal{S}}$ – вектор минимальных скоростей передачи данных для абонента слайса s , определенных в соглашениях об уровне обслуживания между владельцем сети и арендатором слайса s , *бум/с*; $\mathbf{N}^{\min} = (N_s^{\min})_{s \in \mathcal{S}}$ – вектор числа абонентов слайса s , которым услуга может быть предоставлена на максимальной скорости; $\mathbf{N} = (N_s)_{s \in \mathcal{S}}$ – вектор числа абонентов слайса s в состоянии, когда ресурсов недостаточно для обеспечения всем абонентам минимальных скоростей передачи данных; $\mathbf{C}(\mathbf{N}) = (C_s(\mathbf{N}))_{s \in \mathcal{S}}$ – вектор емкостей слайсов, *бум/с*.

Теорема 1. В системе с нарезкой радиоресурсов без приоритизации слайсов в состоянии $\mathbf{N}^T = (N_1, N_2, \dots, N_S)$, когда ресурсов недостаточно для обеспечения всем абонентам минимальных скоростей передачи данных, емкость слайса $C_s(\mathbf{N})$ вычисляется по формуле:

$$C_s(\mathbf{N}) = \begin{cases} \frac{N_s^{\min} R_s^{\min}}{\mathbf{N}^{\min} \mathbf{R}^{\min}} C, & \mathbf{N}^{\min} \mathbf{R}^{\min} \geq C; \\ N_s^{\min} R_s^{\min} + \frac{(N_s - N_s^{\min}) R_s^{\min}}{(\mathbf{N} - \mathbf{N}^{\min}) \mathbf{R}^{\min}} (C - \mathbf{N}^{\min} \mathbf{R}^{\min}), & \mathbf{N}^{\min} \mathbf{R}^{\min} < C. \end{cases} \quad (4)$$

Теорема 2. В системе с нарезкой радиоресурсов с приоритизацией слайсов в состоянии $\mathbf{N}^T = (N_1, N_2, \dots, N_S)$ дефицита ресурсов, когда суммарная минимальная требуемая емкость превышает доступную пропускную способность базовой станции, емкость C распределяется в соответствии с установленными приоритетами следующим образом.

1. Если $c_1(\mathbf{N}) \geq C$ (недостаточно ресурсов даже для наивысшего приоритета), емкость распределяется только среди слайсов наивысшего приоритета \mathcal{S}_1 :

$$C_s(\mathbf{N}) = \begin{cases} \frac{N_s^{\min} R_s^{\min}}{c_1(\mathbf{N})} C, & s \in \mathcal{S}_1, \\ 0, & s \in \mathcal{S} \setminus \mathcal{S}_1. \end{cases} \quad (5)$$

2. Если $c_{u^*}(\mathbf{N}) < C$ и $c_{u^*+1}(\mathbf{N}) \geq C$ (дефицит возникает на уровне $u^* + 1$):

$$C_s(\mathbf{N}) = \begin{cases} N_s^{\min} R_s^{\min}, & s \in \mathcal{S}_i: 1 \leq i \leq u^*; \\ \frac{N_s^{\min} R_s^{\min}}{c_{u^*+1}(\mathbf{N}) - c_{u^*}(\mathbf{N})} (C - c_{u^*}(\mathbf{N})), & s \in \mathcal{S}_{u^*+1}; \\ 0, & s \in \mathcal{S}_i: i > u^* + 1. \end{cases} \quad (6)$$

Глава 2 посвящена анализу показателей качества предоставления услуги категории «наилучшее из возможного» с помощью построенной в разделе 2.1 математической модели слайса s с эластичным трафиком в виде СМО с дисциплиной разделения процессора и ограничением на максимальную скорость передачи $s \in \mathcal{S}$. Исследован новый показатель качества обслуживания – деградация (снижения качества) обслуживания абонента, которая наступает при пересечении доступной абоненту скоростью обслуживания некоторого порога R_s^{deg} , таким образом, для абонентов, получающих услугу на скорости ниже пороговой, услуга предоставляется с ненадлежащим качеством. В разделе 2.2 приведены численные результаты моделирования и их анализ, демонстрирующий влияние различных методов вызова процедуры нарезки на вероятность деградации обслуживания P_s^{deg} , коэффициент использования ресурса и частоту вызова процедуры нарезки ресурса.

Основным результатом Главы 2 является Утверждение 1 для расчета вероятности деградации обслуживания абонента в слайсе.

Утверждение 1. Пусть СМО $M | M | C | 0, R_s^{\text{max}}$ с дисциплиной разделения процессора моделирует получение абонентами слайса s с эластичным трафиком услуги категории «наилучшее из возможного» с ограничением на максимальную скорость передачи данных абонентским устройством.

Тогда вероятность P_s^{deg} деградации обслуживания абонента может быть вычислена по формуле

$$P_s^{\text{deg}} = 1 - \sum_{N=0}^{N^{\text{cont}}} p_N, \quad (7)$$

где распределение $\{p_N, N \geq 0\}$ имеет вид

$$p_N = \begin{cases} \frac{1}{N!} \left(\frac{\lambda \theta}{R^{\text{max}}} \right)^N p_0, & 1 \leq N \leq M; \\ \left(\frac{\lambda \theta}{C} \right)^{n-M} p_M = \frac{1}{M!} \frac{(\lambda \theta)^N}{C^{N-M} (R^{\text{max}})^M} p_0, & n \geq M, \end{cases} \quad (8)$$

$$p_0 = \left(1 + \sum_{N=1}^{M-1} \frac{1}{N!} \left(\frac{\lambda \theta}{R^{\text{max}}} \right)^N + \frac{1}{M!} \left(\frac{\lambda \theta}{R^{\text{max}}} \right)^M \sum_{N=M}^{\infty} \left(\frac{\lambda \theta}{C} \right)^{N-M} \right)^{-1}, \quad (9)$$

с условием существования стационарного режима

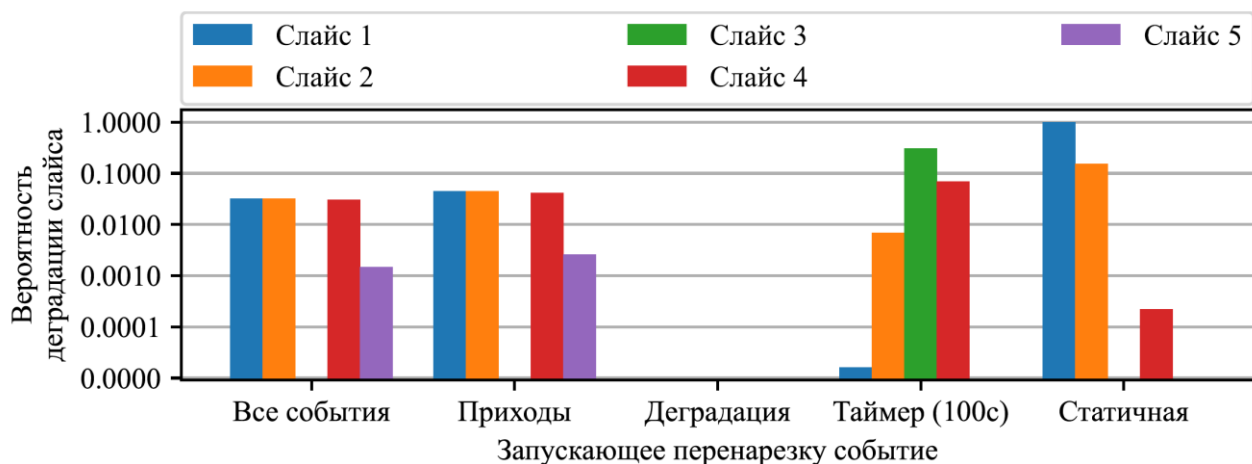
$$\lambda < \frac{C}{\theta}. \quad (10)$$

Исходные данные для численного анализа приведены в табл. 1.

Табл. 1. Исходные данные

C , Гбит/с	8				
S	5				
Номер слайса	1	2	3	4	5
Тип трафика	Буферизованное потоковое видео				Скачивание файла
Описание трафика	SD	HD	UHD (4K)	VR (8K)	Обновление ПО
<i>Параметры схемы нарезки</i>					
R_s^{\min} , Мбит/с	2	5	25	50	30
R_s^{\max} , Мбит/с	2,2	8	30	75	C
q_s (Сценарий I)	0,075	0,075	0,35	0,25	0,25
q_s (Сценарий II)	1	0,075	0,35	0,25	0,25
v_s (Сценарий I)	1	1	1	1	1
v_s (Сценарий II)	1	2	2	2	3
<i>Нагрузочные параметры для стохастического анализа</i>					
Среднее время между заявками λ^{-1} , с	1,65	7,25	16	19	5
Средний размер файла θ , ГБ	0,3	1,2	2,5	5	1

На рис. 1 для системы с разделением ресурсов с $S = 5$ слайсами представлена вероятность деградации обслуживания P_s^{deg} для пяти вариантов вызова процедуры нарезки ресурса: по событиям (поступление заявки, окончание обслуживания заявки, деградация, таймер); по приходам (при поступлении новой заявки); при деградации обслуживания (при падении скорости получения услуги абонентами слайса ниже порога R_s^{deg}); по таймеру (100 с); статичная (первоначальная нарезка ресурса не меняется).



а) Сценарий I

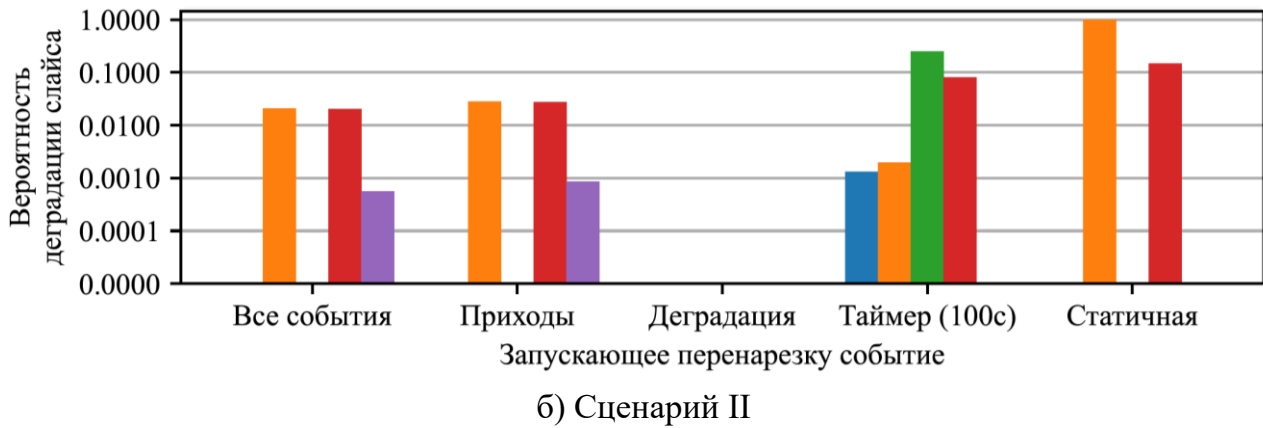


Рис. 1. Вероятность деградации P_s^{deg} для разных методов вызова процедуры нарезки ресурса

Показано, что вызов процедуры нарезки ресурса по событию деградации значительно снижает вероятность деградации для всех слайсов, часто до нуля для критически важных.

Глава 3 посвящена построению модели передачи трафика в сети интегрированного доступа и транзита с полудуплексным и полнодуплексным режимами передачи в радиоканале на основе технологии нарезки ресурса по времени. В разделе 3.1 выполнен аналитический обзор задач анализа качества обслуживания в сети интегрированного доступа и транзита. В задачу оптимизации сети включен новый показатель качества обслуживания – возраст информации. Возраст информации равен интервалу времени, прошедшему с момента генерации на удаленной подсистеме последней информации, полученной от нее центральной системой. В разделе 3.2 с помощью построенной модели открытой экспоненциальной СеМО задача разделения ресурсов сети сформулирована и решена как проблема оптимизации с целевыми функциями средней сквозной задержки и среднего пикового возраста информации. Решением проблемы минимизации являются доли времени активности каналов, которые являются параметрами алгоритма разделения временного ресурса менеджером нарезки. Раздел 3.3 содержит анализ метрик производительности сети интегрированного доступа и транзита, формулировку проблем минимизации средней сквозной задержки и среднего пикового возраста информации, а также результаты их решения.

Основным результатом Главы 3 являются Алгоритм 2 расчета оптимальных долей времени активности каналов, минимизирующих среднюю сквозную задержку, и вычисления правостороннего квантиля заданного пикового возраста информации, а также Теорема 3, определяющая в явном виде функцию распределения сквозной задержки на p -пути.

Пусть древовидная сеть интегрированного доступа и транзита задана следующими параметрами:

множество \mathcal{B} базовых станций (донор и ретрансляторы), для каждой из которых задано число N_n секторов антенны для БС n , $n \in \mathcal{B}$; множество \mathcal{E} каналов доступа и каналов транзита; множество \mathcal{P} маршрутов (p -путей) от донора к абонентскому устройству сектора (n, i) , $n \in \mathcal{B}$, $i = 1, 2, \dots, N_n$; подмножества \mathcal{E}_p составляющих p -путь каналов, $\mathcal{E}_p \subseteq \mathcal{E}$, $p \in \mathcal{P}$; матрица конфликтов $\mathbf{F} = (f_{ne})_{n \in \mathcal{B}, e \in \mathcal{E}}$, где в строке, соответствующей базовой станции n , элементы $f_{ne_1} = f_{ne_2} = \dots = 1$, если каналы e_1, e_2, \dots не могут быть активны одновременно; интенсивности Λ_p потоков пакетов извне для абонентского устройства сектора (n, i) конечного n узла p -пути, $n \in \mathcal{B}$, $i = 1, 2, \dots, N_n$, $p \in \mathcal{P}$; емкость C радиоканала; емкости C_e каналов доступа и каналов транзита, $e \in \mathcal{E}$; доли q_e времени активности каналов доступа и каналов транзита, $e \in \mathcal{E}$.

Алгоритм 2. Компоненты вектора $\mathbf{q}^* = (q_1^*, q_1^*, \dots, q_{|\mathcal{E}|}^*)$ оптимальных долей времени активности каналов, минимизирующего значение средней по сети сквозной задержки в нисходящем направлении от донора к абонентскому устройству, и правостороннего квантиля $\delta_{A_p}^+(\alpha)$ заданного уровня α пикового возраста информации для p -пути в сети интегрированного доступа и транзита, $p \in \mathcal{P}$, вычисляются следующим образом.

Входные данные: \mathcal{B} ; $N_n, n \in \mathcal{B}$; \mathcal{E} ; \mathcal{P} ; $\mathcal{E}_p \subseteq \mathcal{E}, p \in \mathcal{P}$; \mathbf{F} ; $\mathbf{\Lambda} = (\Lambda_p)_{p \in \mathcal{P}}$; C .

Выходной параметр: $\mathbf{q}^* = (q_e^*)_{e \in \mathcal{E}}$; $\delta_{A_p}^+(\alpha), p \in \mathcal{P}$.

1. Вычисление компонент вектора интенсивностей $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_e)_{e \in \mathcal{E}_p}$ потоков пакетов на e -канал по формуле

$$\lambda_e = \sum_{p: e \in \mathcal{E}_p} \Lambda_p, e \in \mathcal{E}. \quad (11)$$

2. Вычисление компонент вектора $\mathbf{q}^* = (q_1^*, q_1^*, \dots, q_{|\mathcal{E}|}^*)$ оптимальных долей времени активности каналов как решение методом множителей Лагранжа проблемы оптимизации $U(\mathbf{q}) \rightarrow \min_{\mathbf{q}}$ с целевой функцией для сквозной задержки

$$U(\mathbf{q}) = \frac{1}{\sum_{p \in \mathcal{P}} \Lambda_p} \sum_{p \in \mathcal{P}} \left(\Lambda_p \cdot \sum_{e \in \mathcal{E}_p} \frac{1}{C_e q_e - \lambda_e} \right) \quad (12)$$

в ограничениях $R_1: 0 \leq q_e \leq 1, \forall e \in \mathcal{E}$; $R_2: \lambda_e \leq C_e q_e, \forall e \in \mathcal{E}$; $R_3: \mathbf{Fq}^T \leq \mathbf{1}$, обеспечивающих существование стационарного режима функционирования сети

интегрированного доступа и транзита с матрицей конфликтов $\mathbf{F} = (f_{ne})_{n \in \mathcal{B}, e \in \mathcal{E}}$, отражающей режимы передачи данных (полудуплексный, полнодуплексный) в каналах доступа и каналах транзита.

3. Получение правостороннего квантиля $\delta_{A_p}^+(\alpha)$ заданного уровня α пикового возраста информации для маршрута p в сети интегрированного доступа и транзита как $\delta_{A_p}^+(\alpha) = \delta_{1-\alpha}$, где $\delta_{1-\alpha}$ – решение уравнения

$$\mathbf{1} - \boldsymbol{\beta}^T e^{\mathbf{N}_p \delta_{1-\alpha}} \mathbf{1} = 1 - \alpha, \quad (13)$$

в котором $\boldsymbol{\beta}^T = (1, 0, \dots, 0)$ – вектор-строка размерности $|\mathcal{E}_p| + 1$, $\beta_1 = 1$ соответствует ближнему к донору каналу,

матрица \mathbf{N}_p – диагональная матрица размерности $(|\mathcal{E}_p| + 1) \times (|\mathcal{E}_p| + 1)$

$$\mathbf{N}_p = \begin{pmatrix} -A_p & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -(C_1 q_1 - \lambda_1) & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -(C_{|\mathcal{E}_p|} q_{|\mathcal{E}_p|} - \lambda_{|\mathcal{E}_p|}) \end{pmatrix}, p \in \mathcal{P}. \quad (14)$$

Теорема 3. Для древовидной сети интегрированного доступа и транзита случайная величина D_p сквозной задержки на p -пути, начинающемся с e^* -канала, $e^* \in \mathcal{E}_p \subseteq \mathcal{E}$, имеет РН-распределение с функцией распределения вида

$$F_{D_p}(x) = 1 - \boldsymbol{\beta}^T e^{\mathbf{M}_p x} \mathbf{1}, p \in \mathcal{P}, \quad (15)$$

где $\boldsymbol{\beta}^T = (\beta_e)_{e \in \mathcal{E}_p}$ – вектор-строка размерности $|\mathcal{E}_p|$ с компонентами

$$\beta_e = \begin{cases} 1, & e = e^*; \\ 0, & e^* \in \mathcal{E}_p \setminus \{e^*\}, \end{cases} \quad (16)$$

матрица \mathbf{M}_p – диагональная матрица размерности $|\mathcal{E}_p| \times |\mathcal{E}_p|$ с ненулевыми элементами вида $(\lambda_e - C_e q_e)$, $e \in \mathcal{E}_p$, $p \in \mathcal{P}$.

На рис. 2 представлена схема сети интегрированного доступа и транзита, организованная в виде древовидного графа. Квадратом обозначена базовая станция-донор, имеющая прямое соединение с опорной сетью, кругами – базовые станции-ретрансляторы, треугольниками – группы абонентских устройств, каждая из которых соответствует конечному пункту назначения многошагового пути передачи данных. Ребра соответствуют беспроводным каналам связи, при этом выделяются транзитные каналы и каналы абонентского доступа.

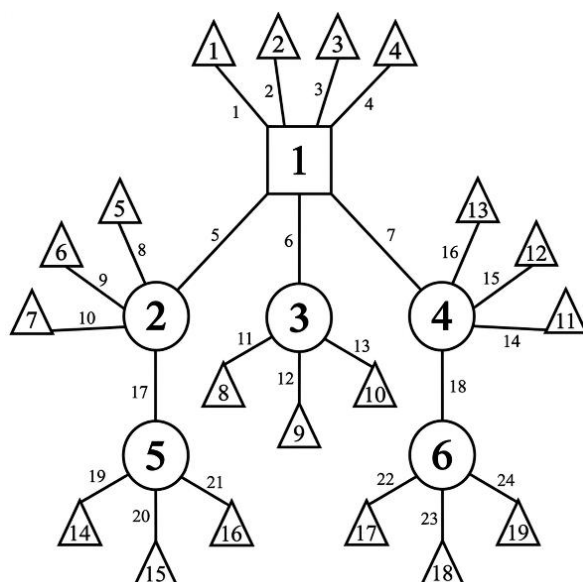


Рис. 2. Схема сети интегрированного доступа и транзита:
квадрат – донор, круг – ретранслятор, треугольник – абоненты узла сети

Рис. 3 демонстрирует график зависимости средней сквозной задержки по сети d от удельной (для одного абонентского устройства) нагрузки $\lambda = 0,2 \text{ мс}^{-1}$ при разных значениях C емкости радиоканала. При этом число абонентов, подключенных к донору, выбрано равным $4 \cdot 185$, к каждому из остальных узлов – $3 \cdot 62$, длина пакета $\theta = 1500$ байт. Заметим, что $C = 20 \text{ Гб/с}$ оптимальные значения q^* долей активации каналов $q_1^* = \dots = q_4^* \approx 0.1$; $q_5^* = q_7^* \approx 0.22$; $q_6^* = 0.16$; $q_8^* = \dots = q_{16}^* \approx 0.17$; $q_{11}^* = \dots = q_{13}^* \approx 0.28$; $q_{17}^* = q_{18}^* \approx 0.26$; $q_{19}^* = \dots = q_{24}^* \approx 0.25$.

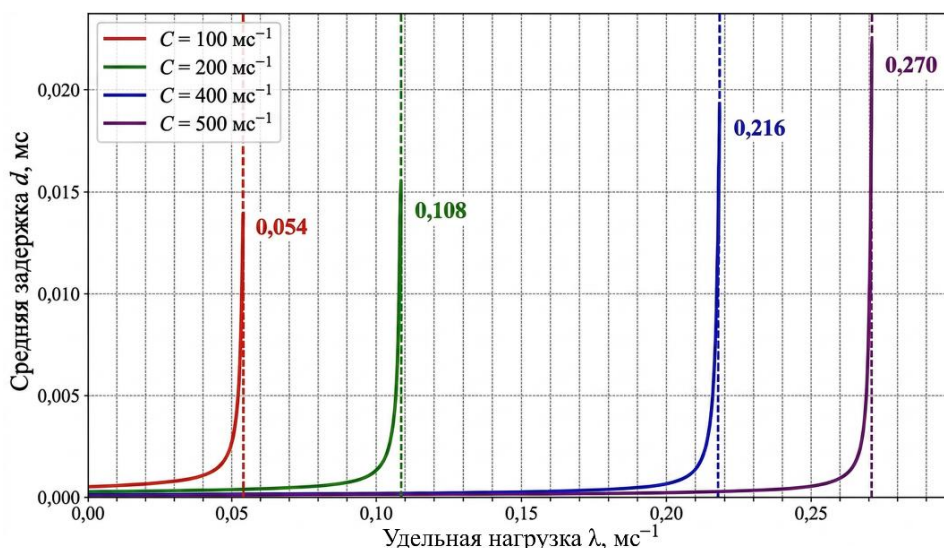


Рис. 3. Зависимость средней по сети сквозной задержки d от нагрузки λ
от одного абонента

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты работы состоят в следующем.

1. Разработана методика разделения ресурсов между слайсами сети с нарезкой ресурса при динамическом выделении ресурса на основе максиминной справедливости с учетом приоритизации слайсов, которая в отличие от известных методик предусматривает избыточное резервирование ресурсов типа «овербукинг».
2. Построена математическая модель слайса услуги эластичным трафиком в виде системы массового обслуживания с дисциплиной разделения процессора и с ограничением на максимальную скорость передачи. Предложено понятие деградации обслуживания в случае падения скорости передачи данных при предоставлении услуги абоненту ниже заданного порога, которое позволило получить аналитическое выражение для вероятности деградации обслуживания и сравнить показатели эффективности обслуживания абонентов для нескольких методов вызова процедуры нарезки ресурса – при поступлении нового запроса, по окончании получения услуги абонентом в сети, при обнаружении деградации обслуживания, при срабатывании регулярного таймера нарезки. Построенная модель позволяет провести сравнительный анализ влияния методов вызова процедуры нарезки ресурса на показатели эффективности обслуживания абонентов – вероятность деградации обслуживания, коэффициент использования ресурса и частоту вызова процедуры нарезки ресурса.
3. Разработан алгоритм численного расчета оптимальных долей времени активности каналов сети интегрированного доступа и транзита с разделением ресурса по времени, минимизирующих среднюю по сети сквозную задержку и средний пиковый возраст информации, а также алгоритм вычисления правостороннего квантиля заданного уровня сквозной задержки и пикового возраста информации на маршруте от донора к абонентскому устройству, при этом в отличие от известных результатов обе случайные величины аппроксимируются с помощью распределения фазового типа.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Gaidamaka E.A., **Platonova A.A.**, Parashchenko A.D., Zhivtsova A.A., Gaidamaka Yu.V. End-to-end Delay Analysis for an Integrated Access and Backhaul Network // Lecture Notes in Computer Science. – 2026. – Т. 16461. – С. 62-73.
2. Самуйлов А.К., **Платонова А.А.**, Шоргин В.С., Гайдамака Ю.В. On modeling the effects of multicast traffic servicing in 5G NR networks [К моделированию эффектов обслуживания многоадресного трафика в сетях 5G NR] // Информатика и ее применения. – 2023. – Т. 17. – № 2. – С. 71-77.
3. Polyakov N., **Platonova A.** Characterizing the Effects of Base Station Variable Capacity on 5G Network Slicing Performance // Communications in Computer and Information Science. – 2023. – Т. 1748. – С. 135-146.
4. Polyakov N., **Platonova A.** Assessing latency of packet delivery in the 5G 3GPP integrated access and backhaul architecture with half-duplex constraints // Future Internet. – 2022. – Т. 14. – № 11. – С. 345.
5. Khayrov E. M., Prosvirov V. A., **Platonova A.A.** Traffic Arrival Model for Millimeter Wave 5G NR Systems // Lecture Notes in Computer Science. – 2022. – Т. 13766. – С. 161-175.

Работы в изданиях, входящих в Перечень ВАК

6. Бобрикова Е.В., **Платонова А.А.**, Гайдамака Ю.В., Шоргин С.Я. Пример применения аппарата нейронных сетей при назначении модуляционно-кодовой схемы планировщиком базовой станции сети 5G // Системы и средства информатики. – 2021. – Т. 31. – № 3. – С. 135-143.

Патенты

7. Гайдамака Е.А., Николаев Д.И., **Платонова А.А.**, Самуйлов К.Е. Расчет задержки и пикового возраста информации пакетов в сети DECT с запланированным доступом // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025669968 РФ. – Оpubл. 01.08.2025.
8. Парашенко А.Д., **Платонова А.А.**, Гайдамака Ю.В. Расчёт характеристик задержки в многошаговой сети // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025680621 РФ. – Оpubл. 07.08.2025.
9. Гайдамака Е.А., Николаев Д.И., **Платонова А.А.**, Самуйлов К.Е. Расчет задержки и пикового возраста информации пакетов на листовом узле сети IAB // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025680762 РФ. – Оpubл. 08.08.2025.

Конференции

10. Парашенко А.Д., **Платонова А.А.**, Гайдамака Ю.В. Анализ квантиля сквозной задержки и пикового возраста информации в сети интегрированного доступа и транзита // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем : материалы Всероссийской конф. с международным участием, Москва, 2025. – С. 57-62.
11. Гайдамака Е.А., **Платонова А.А.**, Ким Р., Гайдамака Ю.В. К анализу возраста информации в одноуровневой сети с многоадресной доставкой информации // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур : материалы Пятнадцатой международной конференции, Томск, 2024. – С. 70-72.

Платонова Анна Алексеевна (Россия)

**Построение и анализ модели
для расчета вероятностно-временных характеристик
сети интегрированного доступа и транзита с разделением ресурсов**

В диссертации представлена модель нарезки сети в виде открытой экспоненциальной сети массового обслуживания, позволяющая оптимизировать распределение временного ресурса в сетях интегрированного доступа и транзита в ограничениях на показатели эффективности предоставления услуги пользователю - сквозную задержку и возраст информации. При построении модели разработан алгоритм разделения ресурсов беспроводной сети для обслуживания эластичного трафика на основе максиминной справедливости в условиях приоритизации слайсов, исследована вероятность деградации обслуживания для нескольких методов вызова процедуры нарезки ресурса, сформулирована задача минимизации сквозной задержки в сети интегрированного доступа и транзита и пикового возраста информации на абонентском оборудовании наиболее длинного по числу шагов маршрута от донора. Решением задачи стало распределение временного ресурса (доли времени активности каналов доступа и каналов транзита), которое определяет параметры распределения фазового типа для случайных величин сквозной задержки и пикового возраста информации в сети интегрированного доступа и транзита.

Platonova Anna Alekseevna (Russia)

**Construction and analysis of the model for calculating performance
metrics of an integrated access and backhaul network with resource sharing**

The dissertation presents a network slicing model in the form of an open exponential network, allowing for the optimization of the time resource in Integrated Access and Backhaul (IAB) network within the constraints of end-to-end delay and Age of Information (AoI). In constructing the model, an algorithm of wireless network resource allocation for elastic traffic based on max-min fairness under slice prioritization conditions was developed, the slice service degradation probability for several methods of invoking the resource slicing procedure was investigated, the problem of minimizing end-to-end delay and AoI on subscriber equipment along the longest route from the IAB donor was formulated. The solution to the problem is the time resource allocation (the share of time of activity for each access channel and transit channel), which are included in the parameters of the phase distribution of random values of the end-to-end delay and the average Peak AoI in the IAB network.