

## Моделирование вероятностных характеристик блокировки запросов на предоставление доступа к радиоресурсам беспроводной сети

*С.Н. Гончаренко, И.Р. Радимов*

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»*

**Аннотация:** Сети пятого поколения представляют большой интерес для различных исследований. Одной из наиболее важных и актуальных технологий для эффективного использования ресурсов в сетях пятого поколения является технология нарезки сети Network Slicing. Основная цель работы – произвести моделирование вероятностных характеристик блокировки запросов на предоставление доступа к радиоресурсам беспроводной сети. В ходе работы была рассмотрена зависимость вероятности блокировки запроса в зависимости от интенсивности поступления заявок различных типов. Выяснилось, что вероятность блокировки заявки  $i$ -го типа имеет вид экспоненциальной функции. По результатам анализа, блокировка запросов происходит предсказуемо с учетом характера поступающего трафика. Предварительно существенных недостатков в рассмотренной модели не наблюдается.

**Ключевые слова:** 5G, двухсервисная СМО, минимальная гарантированная скорость, нарезка сети, распределение ресурса, система массового обслуживания, эластичный трафик.

**Введение.** Модели схем доступа к радиоресурсам беспроводной сети имеют большое количество вариаций. Большого научного интереса в переборе количества выделенных ресурсов при потоковом трафике и последующем анализе этих вариантов модели нет. Большее значение имеет изучение влияния различных качественных технологий, в том числе, исследование моделей схем доступа с эластичным типом трафика и нарезкой сети.

Технология нарезки сети является важным технологическим решением для полноценного использования потенциала опорной сети. Она позволяет разделять сеть на отдельные сегменты, каждый из которых обладает собственными вычислительными, запоминающими и коммуникационными ресурсами. Эти ресурсы выделяются активным службам для обеспечения их изоляции друг от друга и достижения заданных уровней производительности. Каждый из сегментов сети может быть настроен в зависимости от

---

специфических требований к обслуживанию, таких, как пропускная способность, покрытие, безопасность, задержка, надежность и т. д. [1-3]

Актуальность исследования моделей схем доступа с эластичным типом трафика и нарезкой сети обусловлена в первую очередь гибкостью в управлении трафиком. Конфигурация из нескольких слайсов сети позволяет выделять гарантированные ресурсы для конкретного типа заявок. Кроме того, в зависимости от потребностей в данный период времени можно увеличивать или уменьшать количество ресурсов в том или ином слайсов сети. Как следствие – операторы имеют широкие возможности по оптимизации ресурсов связи, сохраняя высокий уровень качества обслуживания.

Также важно подчеркнуть актуальность самой технологии нарезки сети Network Slicing. 3GPP в своей документации рассматривает разделение сети как одну из ключевых функций всего стандарта 5G [4]. В связи с этим, у технологии очевидно большое будущее, а следовательно, и решения связанных с ней задач будут востребованы.

В представленной работе будет рассмотрена именно модель схемы доступа к радиоресурсам с эластичным типом трафика и нарезкой сети.

В дальнейшем рассматривается модель с эластичным BG-трафиком, который имеет минимальную гарантированную скорость и негарантированную доставку. Такой трафик обеспечивает минимальную скорость, установленную оператором, а более высокие скорости предоставляются по схеме “наилучшего усилия” [5, 6]. Это обеспечивает приемлемое качество обслуживания для пользователя и меньшие затраты для оператора [7, 8]. Негарантированная доставка может быть улучшена с помощью специальных моделей обслуживания, использующих технологию Network Slicing.

---

**Постановка задачи.** Необходимо произвести анализ одного из вариантов реализации двухсервисной модели схемы доступа к радиоресурсам беспроводной сети с двумя слайсами и трафиком BG. Предложенный к рассмотрению вариант реализации двухсервисной модели был подробно описан в отдельной статье [9]. Схема модели представлена на рисунке 1.

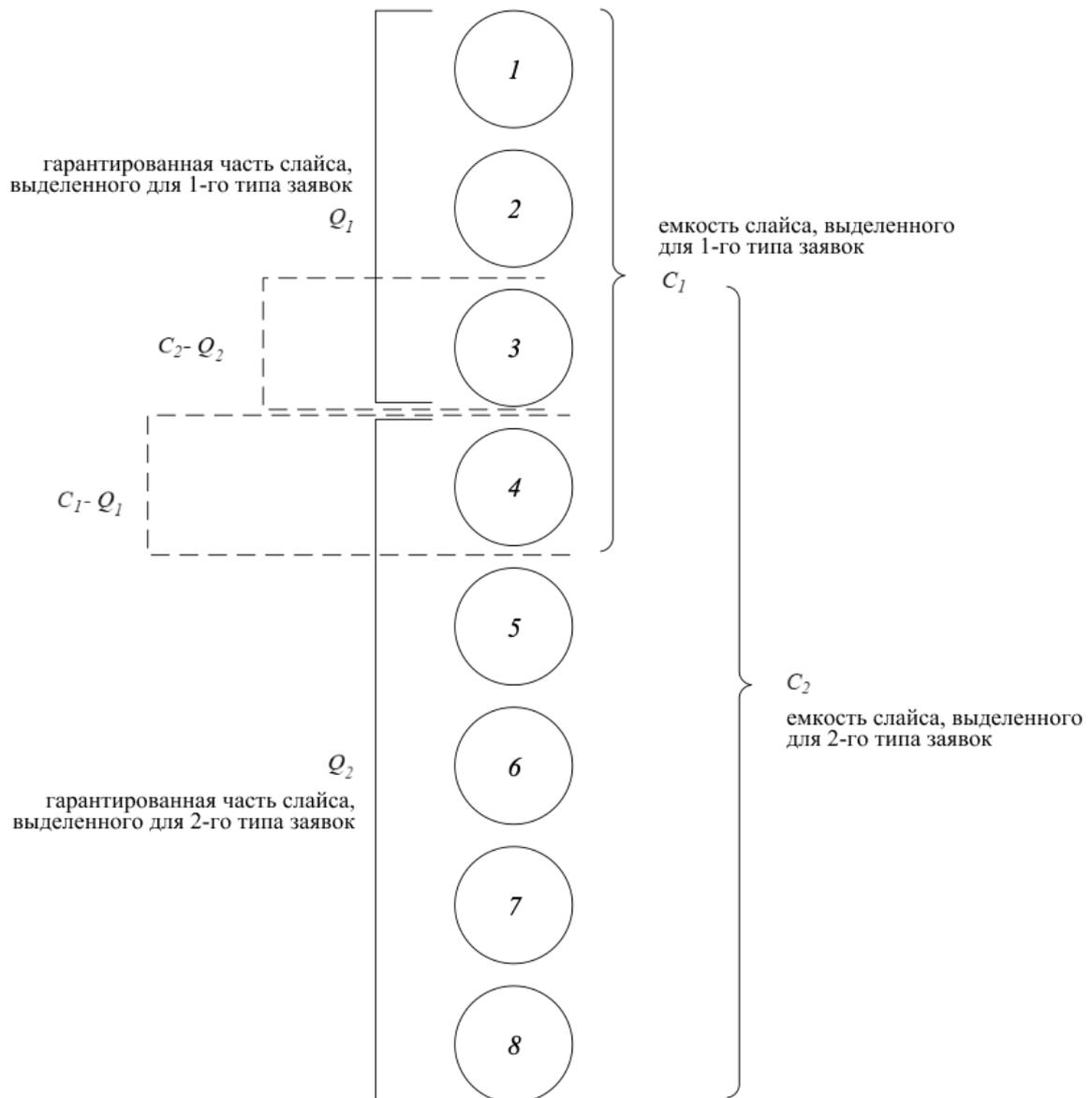


Рис. 1. - Схема двухсервисной модели доступа к радиоресурсам беспроводной сети с двумя слайсами и трафиком BG

Рассматриваемая модель имеет следующую конфигурацию сети: гарантированные части системы не больше, чем вся емкость сети  $Q_1 + Q_2 \leq C$ ,

$C_1 + C_2 \geq C$ ; слайсы имеют общие ресурсы  $Q_1 < C_1, Q_2 < C_2$ ; общая емкость системы  $C$  составляет 8 [ед. ресурса], емкость первого слайса  $C_1$  составляет 4 [ед. ресурса], емкость второго слайса  $C_2$  – 6 [ед. ресурса], гарантированные части слайсов  $Q_1$  и  $Q_2$  составляют соответственно не более 3 и 5 [ед. ресурса] для первого и второго общедоступного слайса, для обслуживания заявки любого типа требуется  $b_1 = b_2 = 1$  [ед. ресурса]. Необходимо рассмотреть зависимость вероятности блокировки поступающих в сеть заявок первого и второго типа от интенсивности их поступления  $\lambda_1, \lambda_2$ .

**Анализ.** Было предложено произвести анализ рассматриваемых вариантов реализации модели. Для начала была рассмотрена зависимость вероятности блокировки поступающих в сеть заявок от интенсивности их поступления. Чтобы получить в качестве результата двумерные зависимости, было рассмотрено два случая: 1) интенсивность поступления заявок второго типа  $\lambda_2$  фиксирована,  $\lambda_1$  изменялось в некотором диапазоне; 2) интенсивность поступления заявок первого типа  $\lambda_1$  фиксирована,  $\lambda_2$  изменялось в некотором диапазоне. При этом, в обоих случаях, среднее время обслуживания заявок первого и второго типа была разной  $\mu_1 \neq \mu_2$ .

Численный анализ был произведен при помощи простого программного кода на языке Python, в основе которого для вычисления распределения вероятностей системы лежал итерационный метод Зейделя в классической реализации [10, 11].

Так как в модели используется эластичный трафик типа BG, по результатам вывода необходимых для осуществления численного анализа формул, выяснились следующие равенства  $B_1 = E_1 = C_1$  и  $B_2 = E_2 = C_2$ . Другими словами, вероятность блокировки запросов  $i$ -го типа на обслуживание по вызовам, времени и нагрузке равны.

Внесем все параметры зависимостей в сводные таблицы: постоянные параметры сведены в таблицу 1, переменные – в таблицу 2.

---

Таблица №1

Постоянные параметры зависимости вероятности блокировки запросов от интенсивности поступления заявок

$C$	8 [единиц ресурсов]
$\mu_1$	3 [единицы времени]
$\mu_2$	4 [единицы времени]

Таблица №2

Переменные параметры зависимости вероятности блокировки запросов от интенсивности поступления заявок

	$\lambda_2$ фиксировано	$\lambda_1$ фиксировано
$\lambda_1$	3–6 [запросов/единицу времени]	5 [запросов/единицу времени]
$\lambda_2$	5 [запросов/единицу времени]	3–6 [запросов/единицу времени]
$Q_1$	3 [единиц ресурсов]	
$Q_2$	5 [единиц ресурсов]	
$C_1$	4 [единиц ресурсов]	
$C_2$	6 [единиц ресурсов]	
$b_1$	1 [единиц ресурсов]	
$b_2$	1 [единиц ресурсов]	

Результат подсчета вероятностей блокировки заявок первого и второго типа при указанных в сводной таблице параметрах представлены в виде числовых значений (таблица 3) и на графиках зависимостей (рис. 2, 3).

Таблица 3

Вероятности блокировки заявок 1 и 2 типа на предоставление доступа к радиоресурсам беспроводной сети

$\lambda_2$ фиксировано	$\lambda_1$ фиксировано
-------------------------	-------------------------

$\lambda_1$	$\lambda_2$	$B_1$	$B_2$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$B_1$	$B_2$
3	5	0.00641276	0.00458054	5	3	0.10378163	0.10182487
3,2	5	0.00783256	0.00559469	5	3,2	0.10464229	0.10225231
3,4	5	0.00956671	0.00683337	5	3,4	0.10569351	0.10277437
3,6	5	0.01168481	0.00834629	5	3,6	0.10697747	0.10341203
3,8	5	0.01427186	0.01019419	5	3,8	0.1085457	0.10419087
4	5	0.01743169	0.01245121	5	4	0.11046115	0.10514214
4,2	5	0.02129111	0.01520794	5	4,2	0.11280068	0.10630402
4,4	5	0.02600502	0.01857502	5	4,4	0.11565818	0.10772316
4,6	5	0.03176261	0.02268758	5	4,6	0.11914835	0.10945649
4,8	5	0.03879494	0.02771067	5	4,8	0.12341125	0.11157358
5	5	0.04738424	0.03384589	5	5	0.12861797	0.1141594
5,2	5	0.05787524	0.04133946	5	5,2	0.13497746	0.11731774
5,4	5	0.07068898	0.05049213	5	5,4	0.14274497	0.12117534
5,6	5	0.08633972	0.06167123	5	5,6	0.15223223	0.12588701
5,8	5	0.10545557	0.07532541	5	5,8	0.16381999	0.13164187
6	5	0.12880372	0.09200266	5	6	0.17797332	0.13867087

По полученным зависимостям однозначно можно сказать, что запросы первого типа блокируются с большей вероятностью чем запросы второго типа. Объясняется это выбранной конфигурацией, гарантированная часть для заявок первого типа больше, чем для второго. Синяя кривая на графике показывает значения вероятности блокировки запросов на обслуживание первого типа, оранжевая – запросов второго типа.

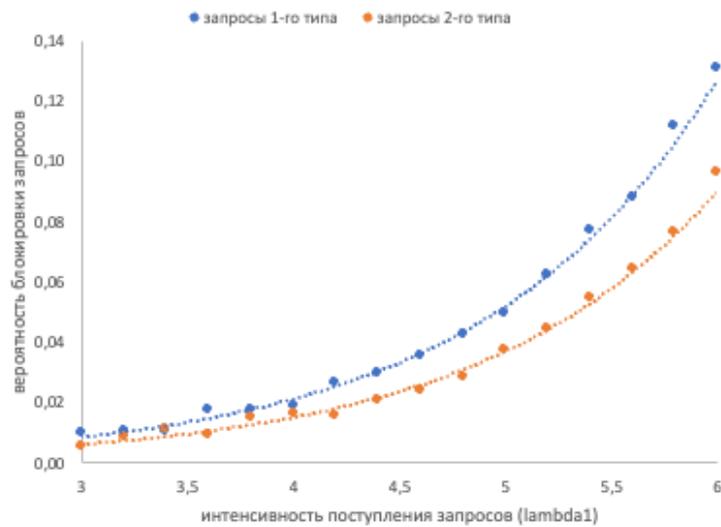


Рис. 2. - Вероятность блокировки запроса в зависимости от интенсивности  $\lambda_1$  ( $\lambda_2$  фиксирована)

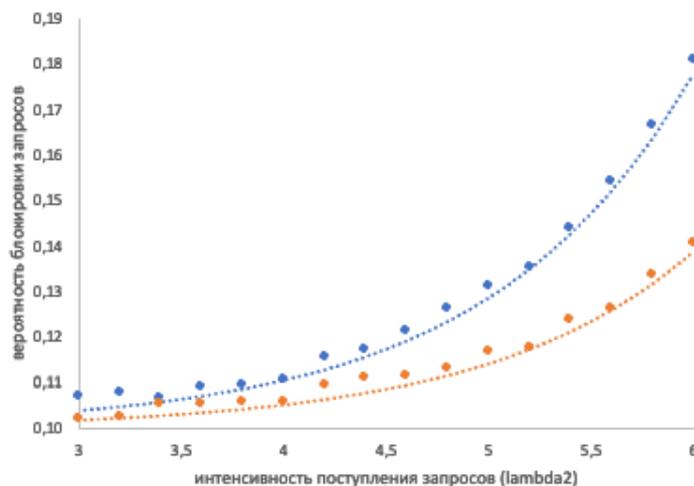


Рис. 3. - Вероятность блокировки запроса в зависимости от интенсивности  $\lambda_2$  ( $\lambda_1$  фиксирована)

Коэффициенты корреляции  $\lambda_1$  (при фиксированном  $\lambda_2$ ) и вероятностей блокировки заявок  $B_1$  и  $B_2$  составляют 0,926 и 0,920. Для случая, когда  $\lambda_1$  фиксировано – 0,934 и 0,923 соответственно. Высокая корреляция свидетельствует о наличии прямой положительной связи между интенсивностью поступления заявок и вероятностью блокировки.

По графикам зависимостей можно сделать выводы о экспоненциальном характере зависимости вероятности блокировки от интенсивности поступлений заявок. Построенные линии тренда явно на это указывают. Следовательно, вероятность блокировки заявки  $i$ -го типа имеет следующий вид функции:

$$B_i = f_i(\lambda_1, \lambda_2),$$
$$f_i(\lambda_1, \lambda_2) = a_{0i} + a_{1i} e^{b_1 \lambda_1} + a_{2i} e^{b_2 \lambda_2},$$

где  $a_{ji}, b_j$  – некоторые вещественные коэффициенты.

Это же подтверждается в ходе регрессионного анализа. Пользуясь методом наименьших квадратов, были выявлены следующие линии тренда:

$$B_1 = f_1(\lambda_1, \lambda_2 = const) = 0,0008e^{0,8361\lambda_1}$$
$$B_2 = f_2(\lambda_1, \lambda_2 = const) = 0,0006e^{0,8159\lambda_1}$$
$$B_1 = f_1(\lambda_1 = const, \lambda_2) = 0,0594e^{0,1669\lambda_2}$$
$$B_2 = f_2(\lambda_1 = const, \lambda_2) = 0,0762e^{0,09\lambda_2}.$$

Таким образом, для большего понимания характера зависимости вероятности блокировки от интенсивности поступления заявок обоих типов, необходимо рассмотреть семейство кривых  $B_i = f_i(\lambda_1, \lambda_2)$ , таких что  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  не являются константами. В таком случае рассматривается зависимость  $\lambda_2 = \varphi(\lambda_1)$ , при этом каждой из кривой ставится в соответствие вероятность  $B_i = f_i(\lambda_1, \lambda_2)$ .

Результаты проведенного численного анализа представлены в таблице 4. Полученные зависимости отображены на графиках (рис. 4, 5). Пользуясь методом наименьших квадратов, также были выявлены линии тренда – в данном случае, зависимости имеют вид  $\lambda_2 = \varphi(\lambda_1) = a_i \lambda_1^{b_i}$  (степенная функция).

Таблица 4

Результаты построения семейства кривых  $B_1$  и  $B_2$

Название кривой	Коэфф. корреляции $r(\lambda_1, \lambda_2)$	Линия тренда
$B_1 = 0,0064127600$	-0,872638	$\lambda_2 = 22,160\lambda_1^{-1,262}$
$B_1 = 0,0174316900$	-0,870121	$\lambda_2 = 41,487\lambda_1^{-1,427}$
$B_1 = 0,0473842400$	-0,878081	$\lambda_2 = 79,228\lambda_1^{-1,603}$
$B_1 = 0,1288037200$	-0,865069	$\lambda_2 = 127,53\lambda_1^{-1,722}$
$B_2 = 0,00458054$	-0,876026	$\lambda_2 = 20,945\lambda_1^{-1,231}$
$B_2 = 0,01245121$	-0,879464	$\lambda_2 = 23,026\lambda_1^{-1,026}$
$B_2 = 0,03384589$	-0,894054	$\lambda_2 = 24,296\lambda_1^{-0,909}$
$B_2 = 0,09200266$	-0,90288	$\lambda_2 = 24,689\lambda_1^{-0,838}$

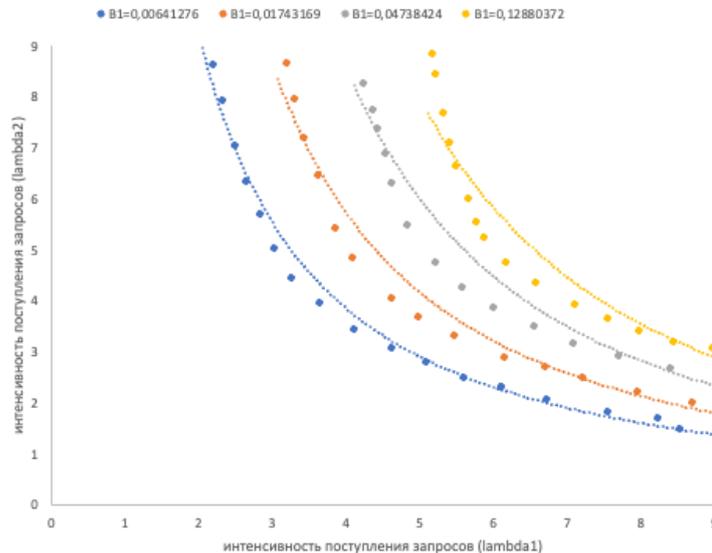


Рис. 4. - Семейство кривых интенсивности для определения вероятности блокировки заявок 1-го типа

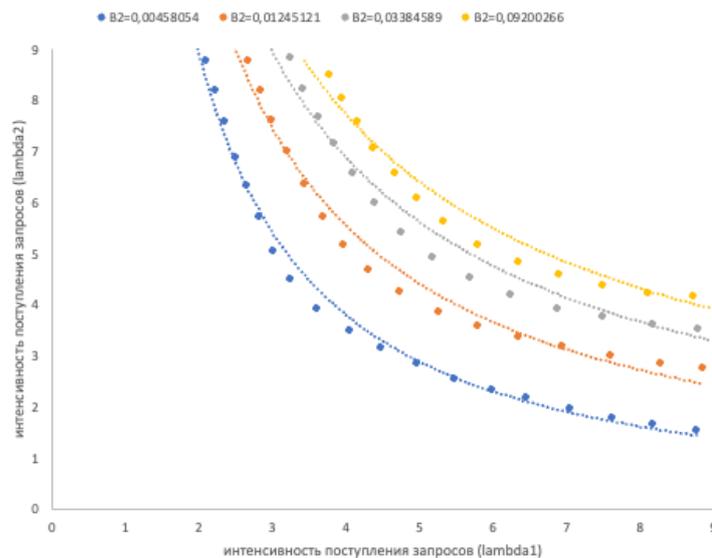


Рис. 5. - Семейство кривых интенсивности для определения вероятности блокировки заявок 2-го типа

Полученные графики позволяют оценить динамику увеличения вероятности блокировки при изменении интенсивности поступления как заявок первого, так и второго типа.

Для заявок первого типа справедливо следующее: увеличение  $\lambda_1$  при высоком значении  $\lambda_2$  приводит к увеличению вероятности блокировки заявок первого типа. То есть, интенсивность поступления заявок второго типа явным образом влияет на вероятность блокировки заявок первого типа.

Для заявок второго типа справедливо аналогичное утверждение, но отличается динамика увеличения вероятности блокировки заявок второго типа. Это прямое следствие выбранной конфигурации ( $C_1 < C_2$ ,  $Q_1 < Q_2$ ).

Рассмотренные зависимости показывают, как вероятностные характеристики зависят от интенсивности поступления запросов на обслуживание в данной системе, и иллюстрируют особенности трафика типа BG. Запросы на обслуживание блокируются, когда ресурсы определенного слоя заполнены, и вытесняются, если ресурсы, зарезервированные для определенного типа запросов, заняты.

**Закключение.** По результатам анализа блокировка запросов происходит предсказуемо с учетом характера поступающего трафика. Предварительно существенных недостатков в рассмотренной модели не наблюдается.

Разработанная модель представляет большой интерес для будущих, более глубоких и долгосрочных исследований, например, с использованием имитационного моделирования, с выбором оптимальных параметров сети. Также необходимо привести результаты анализа к общеизвестным метрикам для полноценного сравнения с другими моделями.

### Литература

1. China Mobile Communication Corporation, Huawei Technologies Co. Deutsche Telekom AG, Volkswagen 5G Service-Guaranteed Network Slicing White Paper. 2017. p. 26.
2. Richart M., Baliosian J., Serrat J., Gorricho J. -L. Resource Slicing in Virtual Wireless Networks: A Survey. IEEE Transactions on Network and Service Management. 2016. №3. pp. 462-476.
3. Khatibi S., Caeiro L., Ferreira L., Correia L., Nikaein N. Modelling and implementation of virtual radio resources management for 5G Cloud RAN. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. vol. 1, 2017. p. 128.
4. 3GPP TS 23.501 V17.4.0 (2022-03): System architecture for the 5G System (5GS); Stage 2 (Release 17). – 3GPP. – 2022.
5. Самуйлов К.Е., Гарибян, А.А. Модель обслуживания гетерогенного трафика для анализа технологии нарезки беспроводной сети LTE. Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. М.: РУДН, 2019. С. 31-34.
6. Яркина Н.В., Гайдамака Ю.В., Самуйлов К.Е. О задаче разделения ресурсов при нарезке сети 5G. Материалы международной научно-

- технической конференции «Инновационные технологии в телекоммуникациях». М.: РУДН, 2019. С. 74-76.
7. Башарин Г.П. Лекции по математической теории телетрафика: Учеб. пособие. 3-е изд. М.: РУДН, 2009. 342 с.
  8. Савич В.Н., Дымова П.И., Поляков Н.А., Власкина А.В., Гудкова И.А. К анализу системы массового обслуживания с двумя очередями и нетерпеливым эластичным трафиком с минимальной скоростью. Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. М.: РУДН, 2019. С. 103-107.
  9. Радимов И. Р. Сценарное моделирование схемы доступа к радиоресурсам беспроводной сети с двумя слайсами. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2023. №12. С. 114-120.
  10. Макеева Е.Д., Поляков Н.А., Харин П.А., Гудкова И.А. Вероятностная модель для анализа характеристик совместной передачи трафика URLLC и eMBB в беспроводных сетях. Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. №52. С. 33-42.
  11. Самуйлов К.Е., Маркова Е.В. К приближенному анализу вероятности блокировки для модели схемы доступа с индивидуальными потолками скорости передачи эластичного трафика в сети LTE. IX Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии и ИТ-образование»: Сб. трудов (Ноябрь 14–16, 2014, Москва). С. 417–425.
-

## References

1. China Mobile Communication Corporation, Huawei Technologies Co. Deutsche Telekom AG, Volkswagen 5G Service-Guaranteed Network Slicing White Paper. 2017. p. 26.
  2. Richart M., Baliosian J., Serrat J., Gorricho J. -L. Resource Slicing in Virtual Wireless Networks: A Survey. IEEE Transactions on Network and Service Management. 2016. №3. pp. 462-476.
  3. Khatibi S., Caeiro L., Ferreira L., Correia L., Nikaein N. Modelling and implementation of virtual radio resources management for 5G Cloud RAN. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. vol. 1, 2017. p.128.
  4. 3GPP TS 23.501 V17.4.0 (2022-03): System architecture for the 5G System (5GS); Stage 2 (Release 17). 3GPP. 2022.
  5. Samuilov K.E., Garibyan, A.A. Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. 2019. pp. 31-34.
  6. Yarkina N.V., Gaydamaka Yu.V., Samuilov K.E. O zadache razdeleniya resursov pri narezke seti 5G. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Innovatsionnye tekhnologii v telekommunikatsiyakh». 2019. pp. 74-76.
  7. Basharin G.P. Lektsii po matematicheskoy teorii teletrafika: Uchebnoe posobie. [Lectures on Mathematical Theory of Teletraffic: Tutorial]. 3-e izd. 2009. 342 p.
  8. Savich V.N., Dymova P.I., Polyakov N.A., Vlaskina A.V., Gudkova I.A. Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. М.: RUDN, 2019. pp. 103-107.
  9. Radimov I. R. Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennyye i Tekhnicheskije Nauki. 2023. No.12. pp. 114-120.
-



10. Makeeva E.D., Polyakov N.A., Kharin P.A., Gudkova I.A. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. 2020. No. 52. pp. 33-42.
11. Samuilov K.E., Markova E.V. IX Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie»: Proceedings (November 14-16, 2014, Moskva). pp. 417-425.

**Дата поступления: 13.02.2024**

**Дата публикации: 24.03.2024**