

# СЦЕНАРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ДОСТУПА К РАДИОРЕСУРСАМ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ С ДВУМЯ СЛАЙСАМИ

**Радимов Игорь Ринадович**  
НИТУ МИСИС, Москва  
buryattvoydrug@gmail.com

## SCENARIO MODELING OF THE WIRELESS NETWORK RADIO RESOURCE ACCESS SCHEME WITH TWO SLICES

**I. Radimov**

*Summary.* Fifth-generation networks are of great interest for various studies. One of the most important technologies for efficient use of resources in fifth-generation networks is Network Slicing. In this paper, we consider a method of resource allocation in 5G wireless networks using Network Slicing technology. In the main part of the work, a model of an access scheme to wireless network radio resources with two slices and BG traffic is constructed. The following is an example of the functioning of the constructed model from the point of view of queuing systems, a matrix of transition intensities is compiled.

*Keywords:* queuing system, 5G, two-service queuing system, resource allocation, Network Slicing, elastic traffic, minimum guaranteed bitrate.

*Аннотация.* Сети пятого поколения представляют большой интерес для различных исследований. Одной из наиболее важных технологий для эффективного использования ресурсов в сетях пятого поколения, является Network Slicing. В данной работе рассматривается способ распределения ресурсов в беспроводных сетях 5G с применением технологии Network Slicing. В основной части работы построена модель схемы доступа к радиоресурсам беспроводной сети с двумя слайсами и трафиком BG. Далее приведен пример функционирования построенной модели с точки зрения систем массового обслуживания, составлена матрица интенсивностей перехода.

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

## Введение

Число пользователей Интернета растет с каждым годом, еще быстрее растет количество устройств, подключенных к интернету. Для функционирования промышленных и транспортных автоматизированных систем необходимо передавать большой объем информации между элементами системы (вычислительными устройствами и датчиками) с определенными параметрами сети: задержкой, пропускной способностью, плотностью подключения, энергоэффективностью, надежностью и т.д. Мобильные сети пятого поколения в различных конфигурациях должны решать эти задачи.

Поиск различных конфигураций и анализ моделей сетей, в особенности сетей с гарантированными под разными задачами ресурсами, является актуальной задачей. Анализ различных конфигураций сетевых сегментов, которые становятся возможными благодаря технологии Network Slicing, помогает определить особенности их функционирования, что способствует более точной настройке сети для выполнения конкретных задач.

Важным технологическим решением для полноценного использования потенциала опорной сети 5G является технология Network Slicing. Она позволяет разделить сеть на отдельные сегменты, каждый из которых обладает собственными вычислительными, запомина-

ющими и коммуникационными ресурсами. Эти ресурсы выделяются активным службам для обеспечения их изоляции друг от друга и достижения заданных уровней производительности [1].

Наиболее интересным для исследования являются фрагменты сети с эластичным типом трафика. В отличие от потокового трафика, эластичный трафик чувствителен к потерям и не чувствителен к задержкам. Он характеризуется переменной скоростью передачи данных, переменным временем обслуживания и заданной фиксированной длиной передаваемого фрагмента файла [2, 3]. Эластичный тип трафика генерируется при передаче файлов по протоколам FTP и P2P, работе служб HTTP и SMTP, а также при передаче сигнального трафика в промышленных и транспортных автоматизированных системах.

В дальнейшем будут рассматриваться модели с BG типом трафика с гарантированной минимальной скоростью и негарантированной доставкой. Такой тип трафика гарантирует заданную оператором минимальную скорость передачи данных, а запрос на более высокую скорость передачи данных обрабатывается по схеме «besteffort» наилучшим возможным образом. В итоге пользователь получает приемлемый уровень QoS, а оператор несёт существенно меньшие затраты. Нейтрализация негарантированной доставки решается по-

строением особых моделей обслуживания трафика с использованием технологии NS [4, 5].

Таким образом, основной задачей представленной работы является построение модели схемы доступа к радиоресурсам беспроводной сети с двумя слайсами и эластичным трафиком типа BG.

### Постановка задачи

Рассматривается модель схемы доступа к радиоресурсам беспроводной сети с двумя слайсами (рис. 1) со следующими параметрами: общая емкость участка сети составляет  $C$  [ед. емкости], емкость первого слайса составляет  $C_1$  [ед. емкости], емкость второго слайса составляет  $C_2$  [ед. емкости],  $C_1 + C_2 \geq C$ . Слайс  $C_k$  состоит из гарантированной (для обслуживания  $k$ -го типа заявок) части емкостью  $Q_k$  и общедоступной части емкостью  $C_k - Q_k$ .

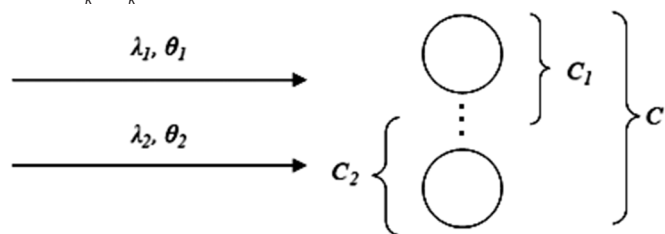


Рис. 1. Схема двухсервисной модели с эластичным трафиком и двумя слайсами

Пусть  $k$ -ый входящий поток запросов имеет пуассоновское распределение с параметрами  $\lambda_k$ . Каждая заявка из  $k$ -го потока занимает при обслуживании  $b_k \leq Q_k$  единиц ресурса сети, среднее время обслуживания заявок  $k$ -го потока составляет  $\mu_k^{-1}$ .

В данной системе заявки упорядочены по приоритетам, которые определяются номером очереди. Если в си-

стему поступает заявка с более высоким приоритетом, она может прервать обработку заявки с более низким приоритетом в общей части системы. Такой подход к обслуживанию заявок отличает эту модель сети от тех, что рассматривались ранее.

Приоритет обслуживания заявок в  $k$ -го потока определяется по принципу Best effort with minimum guaranteed bitrate (BG), который гарантирует минимальную скорость и предусматривает резервирование ресурсов сети для каждого типа заявок [6, 7]. Рассмотрим четыре возможных сценария обработки заявок при их поступлении в систему [8, 9].

Сценарий 1. Числа свободных единиц ресурсов в гарантированной части  $k$ -го слайса достаточно для обслуживания поступившей заявки  $k$ -го типа. В таком случае заявка  $k$ -го типа принимается на обслуживание в гарантированную часть  $Q_k$  логического слайса  $C_k$  (рис. 2А).

Сценарий 2. Числа свободных единиц ресурсов в гарантированной части  $k$ -го слайса недостаточно для обслуживания поступившей заявки  $k$ -го типа. В таком случае заявка  $k$ -го типа принимается на обслуживание в негарантированную часть  $C_k - Q_k$  логического слайса  $C_k$  (рис. 2Б).

Сценарий 3. При поступлении заявки  $k$ -го типа в гарантированной части  $Q_k$  уже обслуживается заявка  $j$ -го типа и в гарантированной части  $Q_k$  недостаточно ресурсов для обслуживания поступившей заявки  $k$ -го типа. В таком случае заявка  $j$ -го типа будет вытеснена заявкой  $k$ -го типа (рис. 3).

Сценарий 4. При поступлении заявки  $k$ -го типа в гарантированной части  $Q_k$  логического слайса  $C_k$  находятся на обслуживании только заявки  $k$ -го типа и все ресурсы логического слайса  $C_k$  заняты. В таком случае

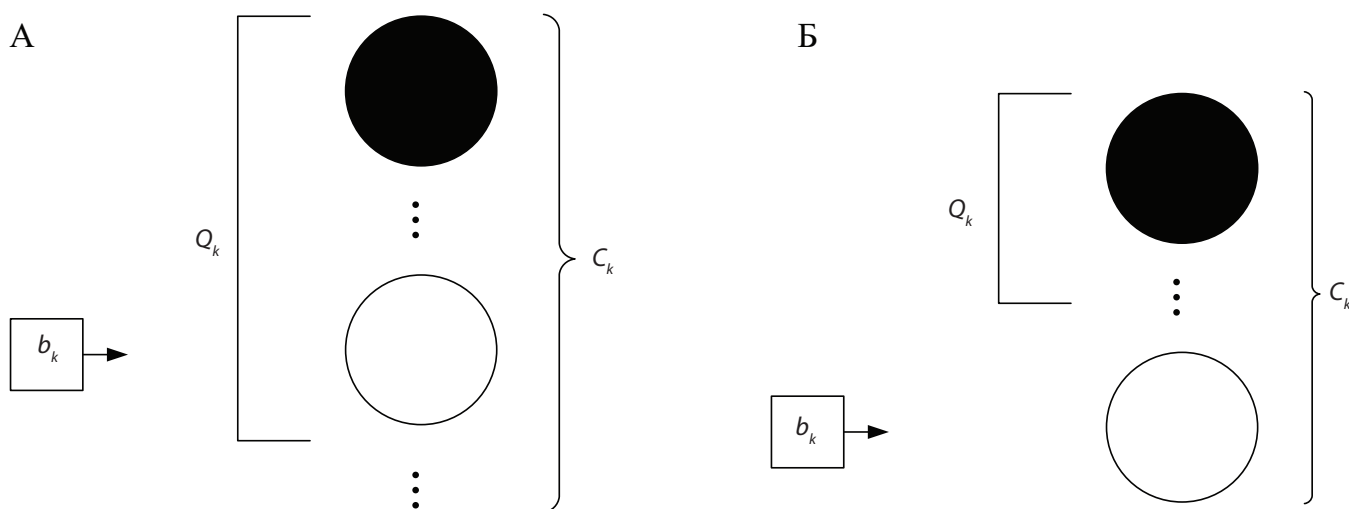


Рис. 2. А — Первый сценарий, Б — Второй сценарий

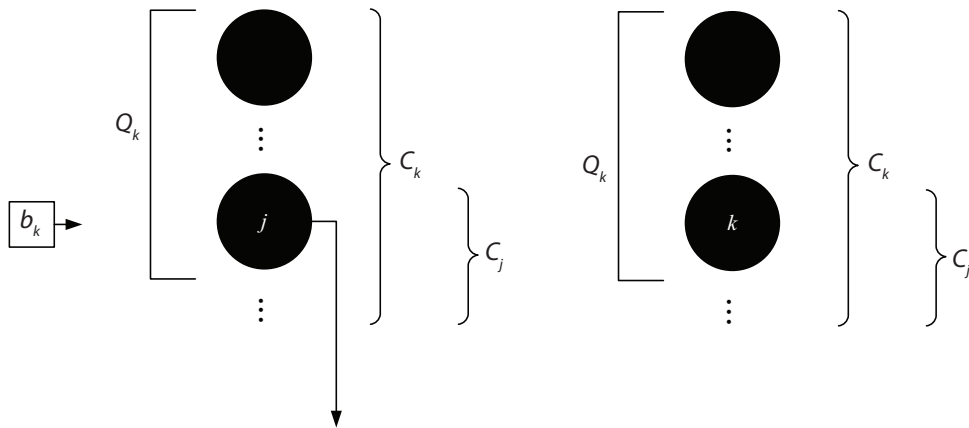


Рис. 3. Третий сценарий

нет возможности вытеснить заявку другого типа, следовательно, заявка на обслуживание блокируется (рис. 4).

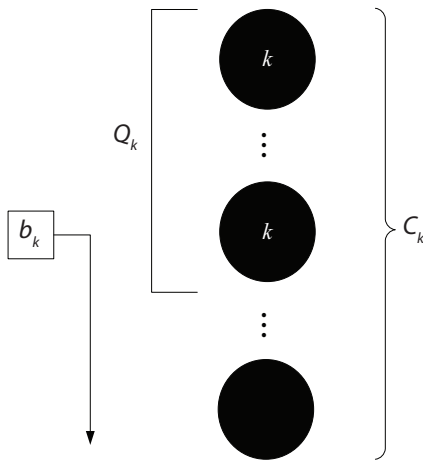


Рис. 4. Четвёртый сценарий

С учетом описанных сценариев обслуживания поступающих в систему заявок необходимо подробно описать модель и рассмотреть пример возможной реализации модели схемы доступа к ресурсам радиосети.

**Формализованное описание модели**

Для рассматриваемой модели запишем пространство состояний системы обслуживания с учетом рассмотренных сценариев обслуживания.

Пространство состояний системы состоит из всевозможных пар чисел  $(x, y)$ , соответствующих количеству заявок в сети, находящихся на обслуживании в момент времени. Таким образом, это множество должно удовлетворять трем условиям: обслуживаемые заявки могут занимать в системе не больше общего заявленного количества ресурсов  $b_1x + b_2y \leq C$ ; обслуживаемые заявки могут занимать только ресурсы выделенных под их тип слайсов  $b_1x \leq C_1, b_2y \leq C_2$ ; множество включает в себя множества, приема и прерывания заявок.

$$X = \left\{ \begin{array}{l} (x, y) \in X | b_1x + b_2y \leq C \\ \leq C_1 \cap b_1x \leq C_1 \cap b_2y \leq C_2 \\ \leq C_2 \cap x \geq 0 \cap y \geq 0 \end{array} \right\},$$

где  $x$  — количество заявок в сети первого типа,  $y$  — количество заявок в сети второго типа,  $b_i$  — минимальная емкость, необходимая для передачи данных [единиц ресурса],  $C$  — общая пропускная способность сети,  $C_i$  — емкость слайса, выделенного для  $i$ -го типа заявок;  $Q_i$  — гарантированная емкость слайса, выделенного для  $i$ -го типа заявок.

Множество приема заявок  $S_k$  включает в себя такие состояния системы, в которых есть возможность принять на обслуживание заявку  $k$ -го типа.

$$S_1 = \left\{ \begin{array}{l} (x, y) \in X | b_1x + b_1 \leq C \\ \leq Q_1 \cup b_1x + b_1 \leq C \\ \leq C_1 \cap b_1x + b_2y + b_1 \leq C \end{array} \right\}$$

$$S_2 = \left\{ \begin{array}{l} (x, y) \in X | b_2y + b_2 \leq C \\ \leq Q_2 \cup b_2y + b_2 \leq C \\ \leq C_2 \cap b_1x + b_2y + b_2 \leq C \end{array} \right\}$$

Множество блокировок заявок состоит из таких состояний системы, в которых новые поступающие заявки  $k$ -го типа будут отклоняться из-за отсутствия свободных ресурсов в  $k$ -ом слайсе.

$$B_1 = \left\{ \begin{array}{l} (x, y) \in X | b_1x + b_1 > C \\ > C_1 \cup b_1x + b_1 > C \\ > Q_1 \cap b_1x + b_2y + b_1 > C \end{array} \right\}$$

$$B_2 = \left\{ \begin{array}{l} (x, y) \in X | b_2x + b_2 > C \\ > C_2 \cup b_2y + b_2 > C \\ > Q_2 \cap b_1x + b_2y + b_2 > C \end{array} \right\}$$

Множество вытеснения заявок состоит из таких состояний системы, в которых новые поступающие заявки  $k$ -го типа будут вытеснять обслуживаемые заявки  $j$ -го типа, имея над ними приоритет.

$$V_1^2 = \left\{ \begin{array}{l} (x, y) \in X | b_1x + b_2y + b_2 > \\ > C \cap b_2y + b_2 \leq Q_2 \end{array} \right\}$$

$$V_2^1 = \left\{ \begin{array}{l} (x, y) \in X | b_1x + b_2y + b_1 > \\ > C \cap b_1x + b_1 \leq Q_1 \end{array} \right\}$$

Для того чтобы составить уравнение равновесия системы, построим диаграмму центрального состояния (рис. 5).

Таким образом, рассматриваемая система является необратимым марковским процессом и описывается следующей системой уравнений равновесия:

$$p_{x,y} \left[ \begin{array}{l} u(x) \frac{b_1\mu_1x}{b_1x + b_2y} + u(y) \frac{b_2\mu_2y}{b_1x + b_2y} + \\ + I((x, y) \in S_1)\lambda_1 + I((x, y) \in S_2)\lambda_2 \end{array} \right] =$$

$$= u(x-2)\lambda_1 p_{x-1,y} + u(y-2)\lambda_2 p_{x,y-1} +$$

$$+ I((x, y) \in V_2)\lambda_2 p_{x+1,y-1} + I((x, y) \in V_1)\lambda_1 p_{x-1,y+1} +$$

$$+ I((x, y) \in S_1 \setminus V_2) \frac{(b_1x + b_1)\mu_1}{b_1x + b_1 + b_2y} p_{x+1,y} +$$

$$+ I((x, y) \in S_2 \setminus V_1) \frac{(b_2y + b_2)\mu_2}{b_1x + b_2 + b_2y} p_{x,y+1}$$

где  $p_{x,y}(x, y) \in X$  — стационарное распределение вероятностей состояний системы,  $u(x)$  — функция Хевисайда,  $I(A)$  — функция индикатор [10].

Стационарное распределение вероятностей  $p_{x,y}(x, y) \in X$  может быть вычислено с помощью числен-

ного решения системы уравнения равновесия  $p \cdot A = 0$ ,  $p \cdot 1^T = 1$ , где  $A$  — матрица интенсивностей переходов системы, элементы которой определены следующим образом:

$$a((x, y)(x', y')) = \begin{cases} \lambda_1, \text{ если } y' = y, x' = x + 1, \\ (x, y) \in S_1 \setminus V_2 \cup y' = y - 1, \\ x' = x + 1, (x, y) \in V_2; \\ \lambda_2, \text{ если } y' = y + 1, x' = x, \\ (x, y) \in S_2 \setminus V_1 \cup y' = y + 1, \\ x' = x - 1, (x, y) \in V_1; \\ \frac{b_1\mu_1x}{b_1x + b_2y}, \text{ если } y' = y, x' = x - 1; \\ \frac{b_2\mu_2y}{b_1x + b_2y}, \text{ если } y' = y - 1, x' = x; \\ *, \text{ если } y' = y, x' = x; \\ 0, \text{ в противном случае,} \end{cases}$$

где

$$* = - \left( \begin{array}{l} u(x) \frac{b_1\mu_1x}{b_1x + b_2y} + u(y) \frac{b_2\mu_2y}{b_1x + b_2y} + \\ + I((x, y) \in S_1)\lambda_1 + I((x, y) \in S_2)\lambda_2 \end{array} \right), (x, y) \in X$$

— состояния системы,  $a(x', y') \in X$  — состояния системы после осуществления перехода,  $u(x)$  — функция Хевисайда,  $I(A)$  — функция индикатор [11].

Запишем формулы для нахождения основных вероятностных характеристик рассматриваемой модели.

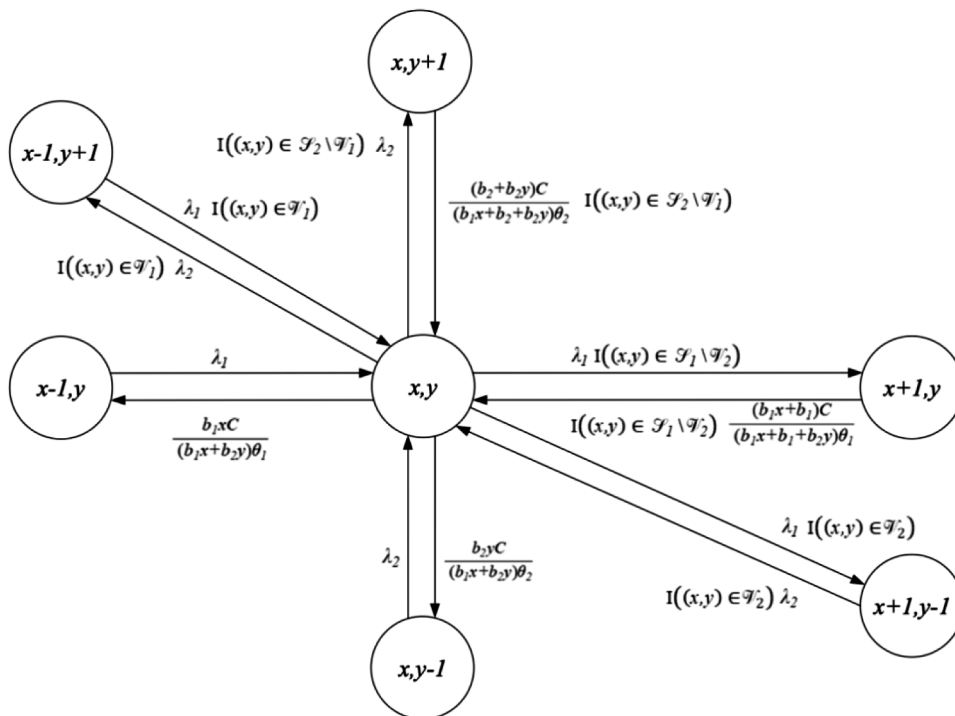


Рис. 5. Диаграмма центрального состояния

Вероятность блокировки  $E_1$  и  $E_2$  запроса на обслуживание заявки первого и второго типа по времени:

$$E_1 = \sum_{(x,y) \in B_1} p_{(x,y)}, E_2 = \sum_{(x,y) \in B_2} p_{(x,y)}$$

Вероятность блокировки  $B_1$  и  $B_2$  запроса на обслуживание заявки первого и второго типа по вызовам:

$$B_1 = \frac{\sum_{(x,y) \in B_1} p_{(x,y)}}{\sum_{(x,y) \in X} p_{(x,y)}} = \sum_{(x,y) \in B_1} p_{(x,y)} = E_1,$$

$$B_2 = \frac{\sum_{(x,y) \in B_2} p_{(x,y)}}{\sum_{(x,y) \in X} p_{(x,y)}} = \sum_{(x,y) \in B_2} p_{(x,y)} = E_2$$

Среднее число обслуживаемых в системе запросов  $\bar{N}_1$  и  $\bar{N}_2$  первого и второго типа:

$$\bar{N}_1 = \sum_{(x,y) \in X} p_{(x,y)} n, \bar{N}_2 = \sum_{(x,y) \in X} p_{(x,y)} m.$$

**Пример функционирования модели**

Рассмотрим пример функционирования модели схемы доступа к радиоресурсам беспроводной сети с двумя слайсами и трафиком BG. Выпишем пространство состояний системы, множество блокировок заявок, множество приёма заявок, множество вытеснения заявок, а также изобразим схему модели и диаграмму интенсивностей перехода.

Рассматривается базовая станция сети с емкостью  $C = 8$ , которая используется совместно двумя слайсами емкостью  $C_1 = 4$ ,  $C_2 = 6$ . В соответствии с приоритетными правилами BG трафика емкость первого слайса  $C_1$  имеет гарантированную часть  $Q_1 = 3$ , в которой приоритет отдаётся заявкам первого типа; емкость второго слайса  $C_2$  имеет гарантированную часть  $Q_2 = 5$ , в которой приоритет отдаётся заявкам второго типа (рис. 6, 7).

В систему обслуживания поступают два потока заявок с интенсивностями  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , каждая заявка требует для обслуживания  $b_1 = 1$  и  $b_2 = 2$  единиц ресурса соответственно.

Множество состояний сети включает в себя 18 состояний.

$$X = \left\{ \begin{matrix} (0,0), (0,1), (0,2), (0,3), (1,0), (1,1), (1,2), (1,3), \\ (2,0), (2,1), (2,2), (2,3), (3,0), (3,1), (3,2) \\ (4,0), (4,1), (4,2) \end{matrix} \right\}$$

Множество приёма заявок первого типа состоит из 15 состояний.

$$S_1 = \left\{ \begin{matrix} (0,0), (0,1), (0,2), (0,3), (1,0), (1,1), (1,2), (1,3), \\ (2,0), (2,1), (2,2), (2,3), (3,0), (3,1), (3,2) \end{matrix} \right\}$$

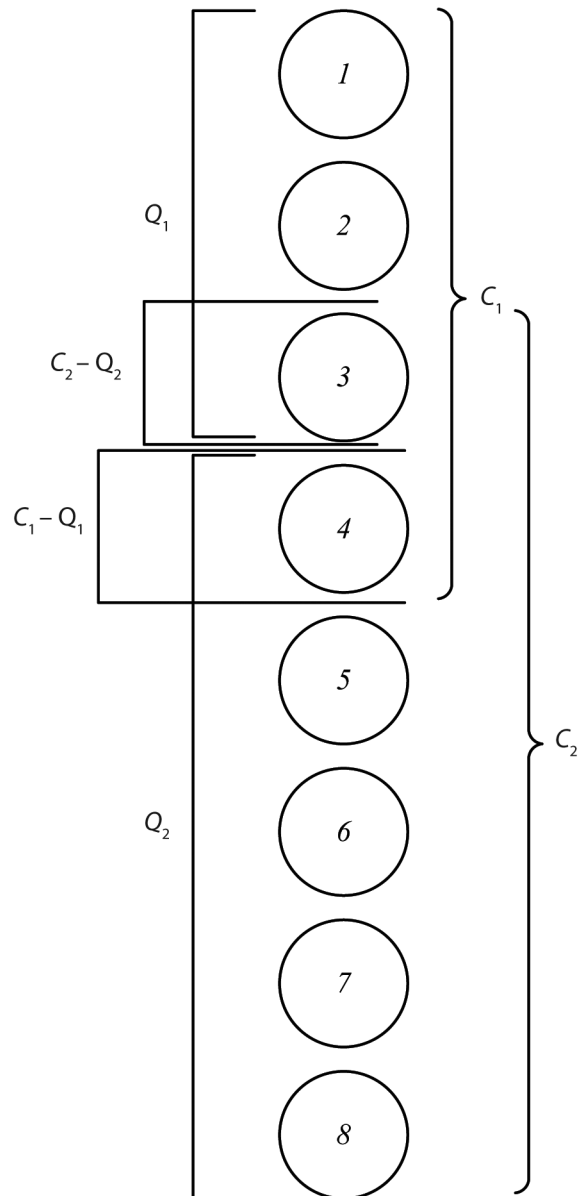


Рис. 6. Схема примера

Множество приема заявок второго типа состоит из 13 состояний.

$$S_2 = \left\{ \begin{matrix} (0,0), (0,1), (0,2), (1,0), (1,1), (1,2), \\ (2,0), (2,1), (2,2), (3,0), (3,1), \\ (4,0), (4,1) \end{matrix} \right\}$$

Множества блокировок заявок первого и второго типа включает в себя 3 и 5 состояний соответственно:  $B_1 = \{(4,0), (4,1), (4,2)\}$ ,  $B_2 = \{(0,3), (1,3), (2,3), (3,2), (4,2)\}$ .

Множество вытеснения заявок первого и второго типа включает в себя 0 и 2 состояния соответственно:  $V_1^2 = \{\emptyset\}$ ,  $V_2^1 = \{(2,3)\}$ .

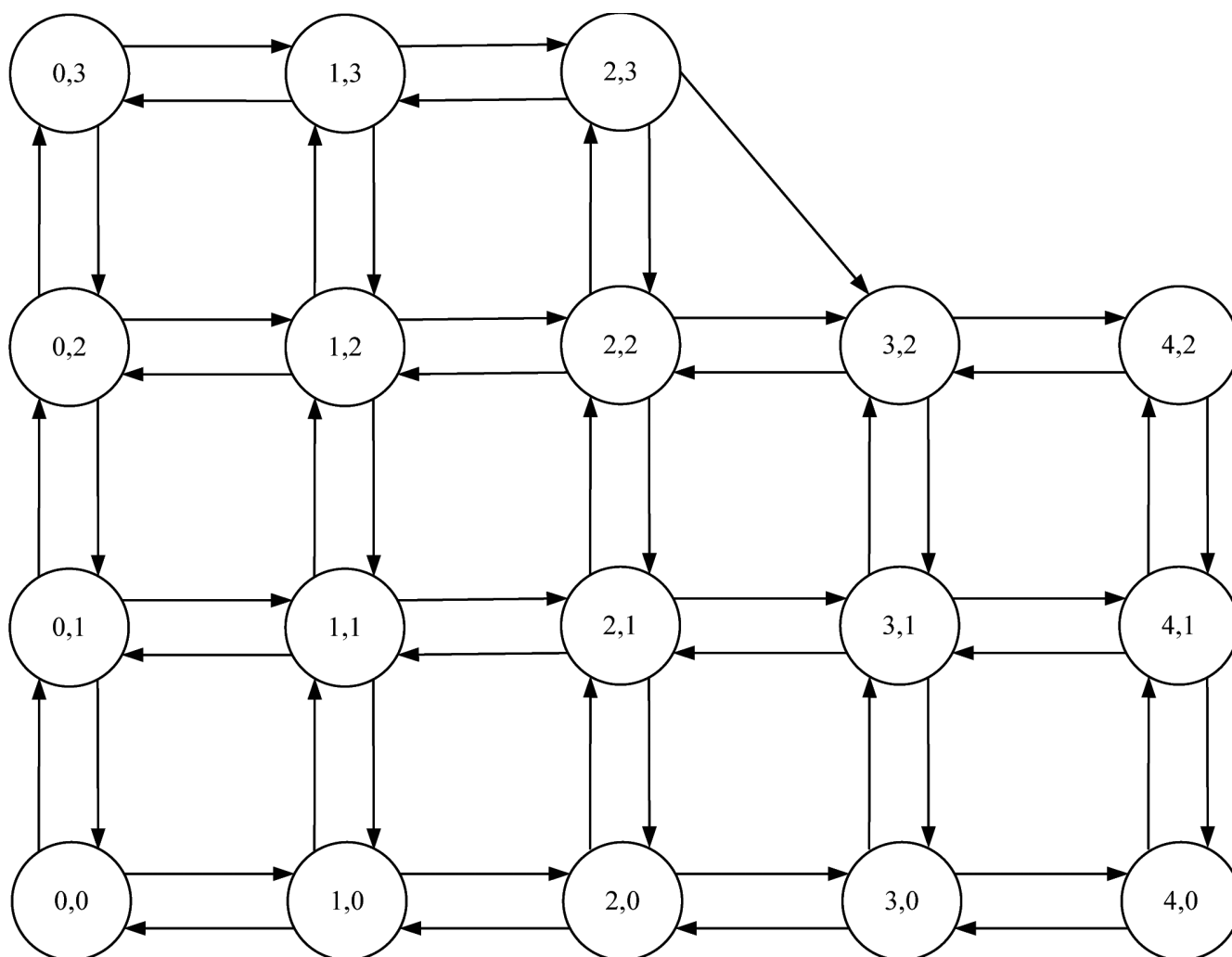


Рис. 7. Матрица интенсивностей перехода примера

### Заключение

В работе представлено построение двухсервисной модели схемы доступа к радиоресурсам с эластичным трафиком BG. Представлен пример возможной реализации, составлена матрица интенсивностей перехода. Кроме того, были записаны системы уравнений глобального и частичного баланса, необходимые для дальнейшего исследования модели. Записанные СУР могут быть использованы для вычисления стационарного распре-

деления вероятностей, с помощью которого были выведены формулы для вычисления основных вероятных характеристик.

В дальнейшем следует провести численный анализ вариантов реализации модели схемы доступа к радиоресурсам беспроводной сети с двумя слайсами и трафиком BG. Результаты численного анализа позволят сделать вывод о целесообразности применимости модели в реальных сценариях использования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. M. Richart, J. Baliosian, J. Serrat, J.-L. Gorricho Resource Slicing in Virtual Wireless Networks: A Survey // IEEE Transactions on Network and Service Management. — 2016. — №3. — С. 462–476.
2. Башарин Г.П. Лекции по математической теории телетрафика: Учеб. пособие. — 3-е изд. — М.: РУДН, 2009. — 342 с.
3. A. Samuylov, V. Beschastnyi, D. Moltchanov, D. Ostrikova, Y. Gaidamaka, V. Shorgin Modeling Coexistence of Unicast and Multicast Communications in 5G New Radio Systems // IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. — Istanbul, Turkey: PIMRC, 2019. — С. 1–6.
4. 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.
5. 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.
6. Vlaskina A., Polyakov N., Kochetkova I. Modeling and Performance Analysis of Elastic Traffic with Minimum Rate Guarantee Transmission Under Network Slicing // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). — СПб.: Springer Verlag, 2019. — С. 621–634.
7. China Mobile Communication Corporation, Huawei Technologies Co. Deutsche Telekom AG, Volkswagen 5G Service-Guaranteed Network Slicing White Paper. — 2017. — 26 с.
8. 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.
9. D. Ivanova, E. Markova, D. Moltchanov, R. Pirmagomedov, Y. Koucheryava, K. Samouylov Performance of Priority-Based Traffic Coexistence Strategies in 5G mmWave Industrial Deployments // IEEE Access. — 2022. — №10. — С. 9241–9256.
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. V. Begishev, D. Moltchanov, E. Sopin, A. Samuylov, S. Andreev, Y. Koucheryavy, K. Samouylov Quantifying the Impact of Guard Capacity on Session Continuity in 3GPP New Radio Systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2019. — №12. — С. 12345–12359.

© Радимов Игорь Ринадович (buryattvoydrug@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»