



МОДЕЛЬ СЕТИ ДОСТУПА ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ НА ОСНОВЕ РЕШЕТЧАТОЙ СТРУКТУРЫ

А. И. Парамонов, С. Н. Бушеленков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: alex-in-spb@yandex.ru

Аннотация—В статье приведен анализ задач построения сетей доступа в сетях связи высокой плотности, предложен метод оценки достижимой скорости передачи данных с учетом взаимных влияний узлов сети, а также метод построения логической структуры сети. **Предмет исследования.** Предметом исследования являются беспроводные сети доступа Интернета вещей. **Метод.** В исследовании используются аналитические методы оценки скорости передачи данных с учетом взаимных влияний узлов сети, а также методы теории перколяции для оценки вероятности связности сети. В работе показано, что логическая структура сети высокой плотности может быть описана в виде решетки с требуемыми свойствами. **Основные результаты.** Результатами работы являются метод оценки скорости передачи данных с учетом внутриканальных помех, а также метод оценки связности, построенный на основе положений теории перколяции для сети с решетчатой структурой. **Практическая значимость.** Практическая значимость полученных результатов состоит в предложении метода выбора логической структуры сети доступа высокой плотности с заданными свойствами, основанного на положениях теории перколяции.

Ключевые слова—сеть доступа, Интернет вещей, связность, теория перколяции, решетчатая структура.

Информация о статье

УДК 004.725.5

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 09.03.2021, принята к печати 24.03.2021.

Ссылка для цитирования: Парамонов А. И., Бушеленков С. Н. Модель сети доступа Интернета вещей на основе решетчатой структуры // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Том 9. № 1. С. 37–46. DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-1-37-46.



MODEL OF THE IOT ACCESS NETWORK BASED ON THE CELL STRUCTURE

A. Paramonov*, S. Bushelenkov

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

*Corresponding author: alex-in-spb@yandex.ru

Abstract—The article analyzes the problems of implementation access networks in high-density communication networks, proposes a method for assessing the achievable data transfer rate, taking into account the mutual influences of network nodes, as well as a method for constructing the logical structure of the network. The possibility of constructing a network model in the form of a cell structure for which the methods of percolation theory are applicable is considered. The use of these methods makes it possible to obtain a structure with specified properties, which makes it possible to ensure the required quality of network functioning.

Keywords—access network, Internet of things, connectivity, percolation theory, lattice structure.

Article info

Article in Russian.

Received 09.03.2021, accepted 24.03.2021.

For citation: Paramonov A., Bushelenkov S.: Model of the IoT access network based on the cell structure // Telecom IT. 2021. Vol. 9. Iss. 1. pp. 37–46 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-1-37-46.



Введение

Развитие инфокоммуникационной системы привело к появлению таких направлений как Интернет вещей и сети с ультрамалыми задержками¹ [1, 2, 3, 4], которые расширяют ее возможности как в доступности информации, так и в качестве предоставления услуг связи. Количество устройств, подключенных к сетям связи уже превысило количество жителей на планете и продолжает увеличиваться. Плотность устройств в сетях связи становится высокой, а согласно прогнозам, в перспективе приблизится, а может быть и превысит одно устройство на квадратный метр [5].

Наибольшие изменения в таких условиях претерпевают сети доступа. Именно на этом уровне сети осуществляется подключение устройств и их взаимодействие между собой. С ростом плотности сети возрастает и сложность построения уровня доступа. Эволюция сетей подвижной связи в наибольшей степени затрагивает именно уровень доступа пользователей. Этот уровень всегда являлся наиболее сложным с технологической точки зрения и поэтому он всегда являлся «узким» местом сети и определял возможности в части качества предоставления услуг связи.

В сетях с высокой плотностью устройств, а также в сетях с повышенными требованиями к величине задержки (в сетях с ультрамалыми задержками) к сетям доступа предъявляются особые требования. При использовании беспроводных технологий они сопряжены с необходимостью выполнения противоречивых требований, с одной стороны, в обеспечении высоких скоростей передачи данных и малых задержек, а с другой стороны, высокой плотности пользователей и как следствие работать в условиях сильных внутриканальных помех.

В сетях 5G эти задачи решаются комплексным использованием различных методов [6]: расширение используемой полосы в радиочастотном спектре, использование пространственно-временного разделения каналов, узконаправленных антенн с управляемой диаграммой направленности, использованием различных технологий (стандартов) организации сети доступа, распределение трафика между различными сетями и многих других.

Сети 5G и перспективные сети связи предполагают широкое взаимодействие с сетями, построенными с использованием различных технологий для выгрузки трафика. Это позволяет разгрузить базовые станции сети и управлять качеством обслуживания трафика.

Все эти процессы должны производиться на уровне абонентского доступа, что требует использования множества методов управления трафиком и структурой сети с целью обеспечения эффективного использования ресурсов и обеспечения требуемого качества предоставления услуг. Для применения таких методов необходимо иметь возможность описать объекты управления.

Целью данной работы является разработка модели сети доступа, с целью описания ее свойств и задачах управления.

¹ The Tactile Internet. ITU-T Technology Watch Report August 2014. [Электронный ресурс]. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/23/01/T23010000230001PDFE.pdf (Дата обращения: 01.03.2020).



Постановка задачи

В общем случае, сеть интернета вещей включает в себя несколько уровней, которые условно можно разделить на уровень доступа, транспортный уровень и уровень услуг (рис. 1).

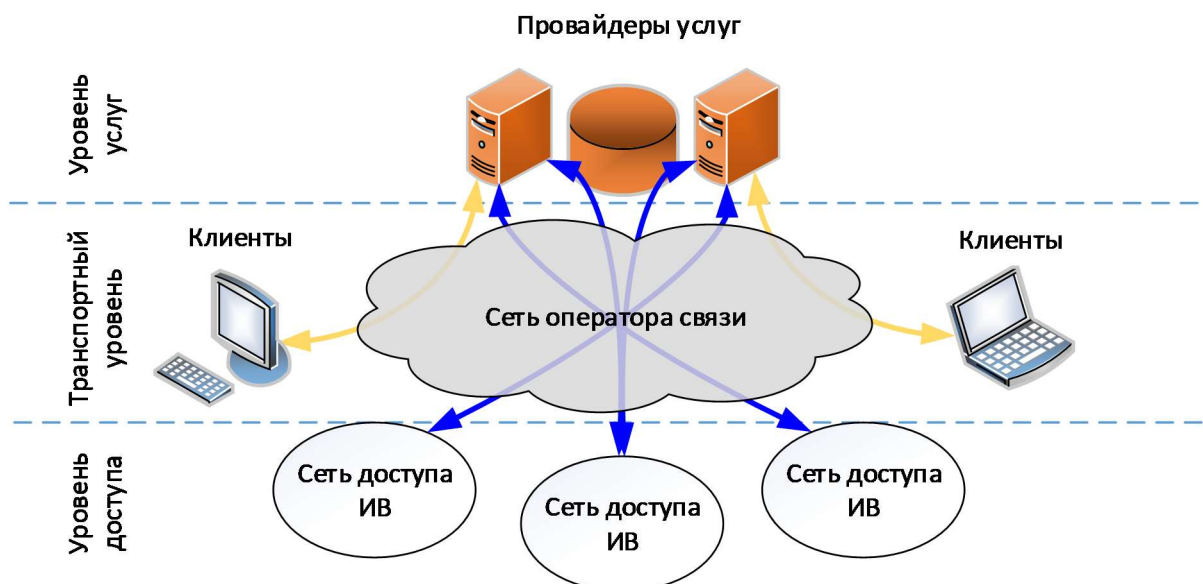


Рис. 1. Структура сети ИВ

Это деление весьма условно, поскольку сети ИВ различного назначения могут включать в себя не все эти уровни или объединять некоторые из них в рамках одной технологии. Однако, такое представление структуры ИВ является наиболее общим, и мы будем его придерживаться.

Наиболее специфичным в данной структуре является уровень сети доступа. Именно реализации этого уровня сети ИВ посвящено большинство работ.

Сеть доступа ИВ, как правило сеть, построенная с использованием беспроводных технологий, часто называемая как беспроводная сенсорная сеть. Для ее построения могут быть использованы различные технологии беспроводной связи, например, WiFi, Bluetooth, ZigBee, LoRaWan и другие. Они позволяют строить сети датчиков (активаторов) распределенных по заданной территории обслуживания. Как правило, такие сети имеют звездообразную, древовидную или ячеистую структуру.

Выбор структуры диктуется целевым назначением сети. Если количество узлов сети определяется единицами и десятками, то ее структура определяется расположением этих узлов в пространстве. Но в случае сетей высокой плотности, когда плотность узлов соизмерима с единицами на 1 кв. м., а может быть и выше, построение логической структуры уже допускает формирование множества произвольных структур, по желанию разработчика. На рис. 2 приведены примеры организации в сети высокой плотности структуры близкой к квадратной (рис. 2а) и треугольной решеткам (рис. 2б).

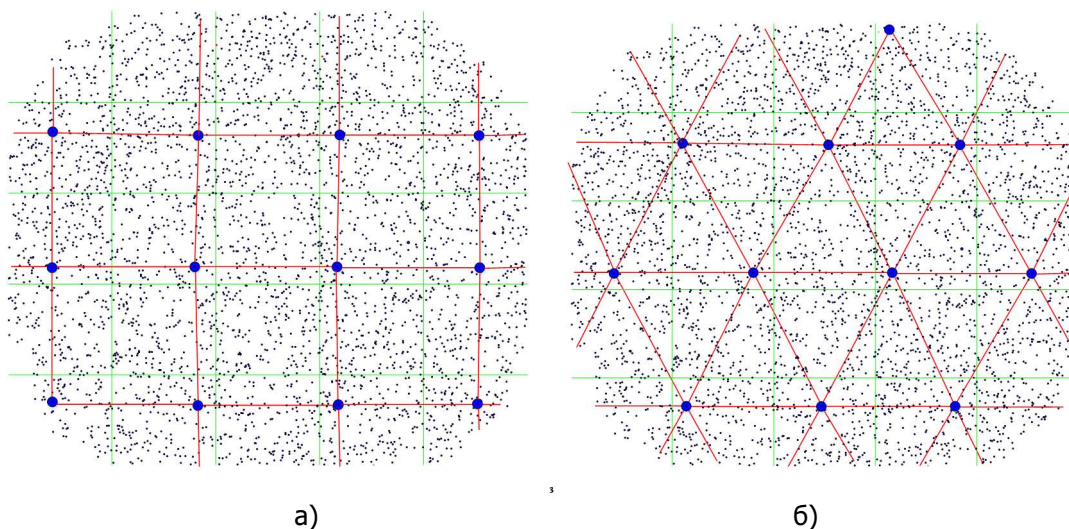


Рис. 2. Пример организации в сети высокой плотности: построение структуры, близкой к квадратной (а) и треугольной (б) решеткам

Если плотность узлов велика, то велика вероятность того, что рядом с целевой точкой, например, позицией узла в квадратной решетке, окажется узел сети. Таким образом, чем выше плотность узлов, тем получаемая в сети структура будет ближе к реализуемой модели. Это свойство также характерно и для сетей с подвижными узлами, т. к. перемещение узла сети из области размещения элемента структуры компенсируется высокой вероятностью перемещения нового узла в эту область. Таким образом, при подвижности узлов имеется возможность сохранять стабильную структуру сети путем изменения функциональности узлов в логической структуре.

Действительно, большинство применяемых для этих целей технологий беспроводной связи обеспечивают дальность (радиус) связи узла от 50 до 100 м (возможно и более), это соответствует случаю, когда в зону связи одного узла попадает приблизительно от 300 до более чем 600 узлов сети. Естественно, что при такой плотности узлов чрезвычайно велики их взаимные влияния – внутриканальные помехи. При определенных условиях это приводит к снижению отношения сигнал/шум, и как следствие, снижение качества радиоканала.

Задачу выбора структуры, в частности, можно свести к задаче построения решетчатой структуры, свойства которой достаточно хорошо известны и могут быть использованы для оценки функционирования получаемой сети.

Решение задачи

Будем полагать, что плотность сети настолько велика, что в данной сети может быть построена структура в форме решетки. В данном случае будем полагать, что решетка прямоугольная. В общем случае, решетка может быть не только прямоугольной, например, треугольной, гексагональной или какой-то другой. Конкретный вид решетки может быть выбран в соответствии с особенностями решаемой задачи.

Будем также полагать, что основным показателем качества сети являются:
– скорость передачи данных,



– вероятность установления соединения между двумя произвольными узлами.

1. Для оценки скорости передачи данных можно применить модель оценки отношения сигнал/шум в которой мощность шума определяется внутриканальными помехами от соседних узлов сети. Мощность этих помех в точке O может быть определена как [5]:

$$p_{0I} = \sum_{j=1}^n p_{oj} I_j, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где p_{oj} – мощность сигнала узла j в точке O (Вт);

n – общее количество узлов;

I – индикаторная функция.

$$I_j = \begin{cases} 1 & p_{oj} \leq p_m \\ 0 & p_{oj} > p_m \end{cases}, \quad (2)$$

где p_m – это пороговая величина мощности сигнала в точке O , при которой состояние канала расценивается как занятое (Вт).

Уровень мощности помехи от j -го узла в точке O можно оценить выбрав модель затухания сигнала $a()$:

$$\tilde{p}_{oj} = \tilde{p}_j - a(d_{oj}), \text{ дБм} \quad (3)$$

где \tilde{p}_j – уровень мощности на выходе j -го узла (дБм);

d_{oj} – расстояние между точкой O и j -м узлом сети (м);

$a(d_{oj})$ – модель зависимости затухания сигнала от расстояния между узлами (дБ).

Символами со знаком «тильда» обозначены уровни мощности в дБм, а без этого знака значения мощности в Вт.

Тогда отношение сигнал/шум можно оценить, как:

$$SNR = \tilde{p}_s - \tilde{p}_{0I}, \text{ дБ}, \quad (4)$$

где \tilde{p}_s – уровень мощности полезного сигнала в точке O .

В качестве модели затухания $a(d_{oj})$ в (3) могут быть выбраны различные модели, в зависимости от условий функционирования сети доступа (открытое пространство, промышленные помещения, жилые здания и т. д.), например [7, 8, 9].



На основе выражения (4) может быть получена оценка скорости передачи данных между узлами, которая определена конкретным стандартом, используемым для организации радиоканала:

$$br = f(SNR), \text{ бит/с}, \quad (5)$$

где $f(SNR)$ – функциональная зависимость скорости передачи данных от величины отношения сигнал/шум, согласно используемому стандарту радиоканала.

2. Вероятность установления соединения между двумя произвольными узлами сети. В данной работе мы предлагаем для оценки возможности установления канала между двумя произвольными узлами сети использовать теорию перколяции (протекания) [7]. При описании структуры сети с помощью решетки, применение данной теории дает возможность оценить возможность установления канала.

В теории перколяции рассматриваются различные типы решеток, как плоских, так и трех и более мерных. Решетка описывает структуру среды. Ячейки решетки могут быть двух типов: проводящие и непроводящие. Решетка содержит какое-то (случайное) количество ячеек того и другого типа. Одной из основных задач этой теории является описание состояния среды, характеризующее соотношением количества проводящих и непроводящих ячеек, при котором возникает «протекание» через данную среду. Это условие также называют образованием перколяционного кластера, т. е. кластера из смежных проводящих ячеек, который и обеспечивает протекание через среду. Пример для плоской квадратной решетки приведен на рис. 3.

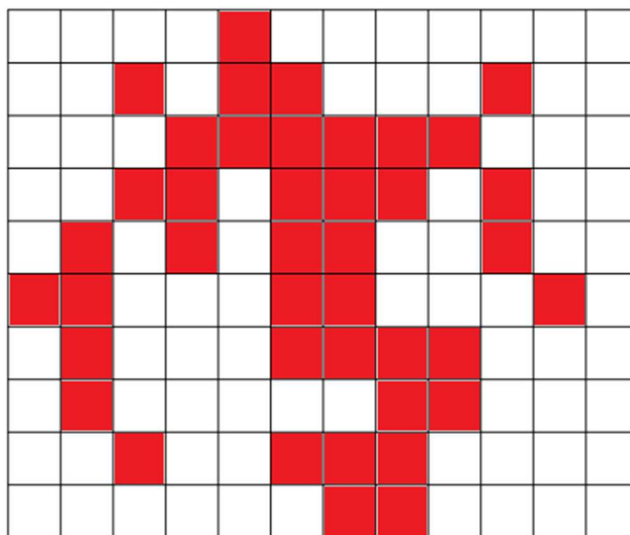


Рис. 3. Модель перколяционной решетки

На приведенном рис. 3 проводящие ячейки закрашены красным цветом, а непроводящие оставлены белыми. Множество смежных красных ячеек и представляет собой перколяционный кластер, проводящий, например, жидкость от верхней границы решетки к нижней.



Теория перколяции широко используется в физике и описывает, например, процессы диффузии в металлах, структура которых описывается различными типами решетчатых трехмерных структур, например, приведенных на рис. 4.

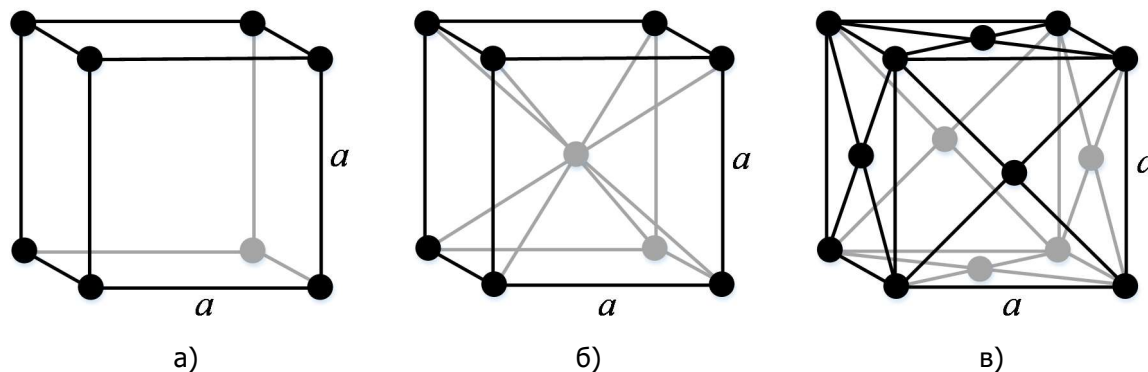


Рис. 4. Примеры кубических решеток:
простая кубическая решетка (а), объемно центрированная кубическая (б),
гранецентрированная кубическая решетка (в)

Вероятность протекания в терминологии данной теории эквивалентна вероятности установления связи между двумя произвольными узлами сети, структура которой описана соответствующим типом решетки.

Вероятность перколяции, оценивают для бесконечно большой решетки, при конечном количестве ячеек, эта вероятность зависит от особенностей решетки [7, 8].

Понятие порога протекания также относят к бесконечной решетке. При конечных размерах решетки порог меняется от случая к случаю, т. е. является величиной случайной. Однако, значения, которые он принимает попадают в некоторую область шириной δ [7]:

$$\delta(N) \approx \frac{c}{\sqrt[N]{N}}, \quad (6)$$

где N – количество ячеек (узлов) решетки,

c – константа ($c \approx 0,5$),

ν – критический индекс (индекс радиуса корреляции).

При увеличении количества ячеек до бесконечности, интервал (6) сужается до точки и вероятность перколяции определяется следующим пределом:

$$p_c = \lim_{N \rightarrow \infty} (p_c(N)). \quad (7)$$

Для каждого типа решёток существует свой порог протекания. Задачи протекания рассматривают либо относительно узлов или относительно связей в решетке. В некоторых случаях порог перколяции может быть получен аналитически. Например, для квадратной двумерной решётки, для перколяции узлов $p_c = 0,59$, для треугольной решётки $p_c = 1/2$ (для той же задачи).



Не все случаи поддаются аналитическим решениям. В таких случаях значения получают методами численного моделирования. Например, для трехмерного случая значения порогов перколяции для нескольких типов решеток приведены в таблице.

Таблица.

Пороги перколяции для некоторых типов решеток

№	Тип решетки	Порог перколяции
1	Простая кубическая	0,310
2	Объемно центрированная кубическая	0,243
3	Гранецентрированная кубическая	0,195
4	Гексагональная	0,200

Как видно из таблицы значения p_c изменяются в пределах от 0,195 для гранецентрированной кубической решетки до 0,310 для простой кубической решетки. Эти значения, с некоторым приближением, можно рассматривать как долю проводящих узлов решетки, при достижении которого (и превышении) структура переходит в связное состояние. С точки зрения сети связи, это соотношение говорит о том, сколько в данной структуре должно быть работоспособных узлов для того, чтобы в ней можно было построить маршрут между двумя произвольными узлами сети.

Выводы

1. Сети доступа являются сложным элементом современной сети связи и как правило, определяют возможности всей сети. Повышение плотности устройств и требований к качеству предоставления услуг создает новые условия, в которых возможно использовать методы, которые ранее были неприменимы. В работе было показано, что рост плотности узлов сети создает потенциальные возможности повышения логической структуры связи. А сама структура связей, благодаря высокой плотности узлов, может выбираться из соображений, диктуемых решением конкретных задач.

2. Если в качестве основных показателей качества функционирования сети выбрать достижимую скорость передачи данных и вероятность установления связи между двумя произвольными узлами сети, то выбирая соответствующую структуры можно добиться требуемой скорости передачи данных учитывая влияния соседних узлов и производимый ими трафик.

3. Логическая структура связей в сети беспроводного доступа Интернета вещей может быть построена в виде решетки. При высокой плотности узлов структура сети может быть достаточно близка к структуре модели и для нее могут быть использованы известные математические методы. В частности, для решетчатой структуры могут быть использованы методы теории перколяции, которые позволяют оценить вероятность связности между двумя произвольными узлами сети.

Исследование выполнено в рамках выполнения ПНИ по государственному заданию СПбГУТ на 2021 год.



Литература

1. Кучерявый А. Е., Парамонов А. И., Аль-Наггар Я. М. Сети связи с малыми задержками // Электросвязь. 2013. № 12. С. 15–19.
2. Кучерявый А. Е., Бородин А. С., Киричек Р. В. Сети связи 2030 // Электросвязь. 2018. № 11. С. 52–56.
3. Чистова Н. А. Методы определения динамического распределения точек предоставления услуг и прогнозирования трафика для сетей связи с ультрамалыми задержками // Электросвязь. 2020. № 12. С. 32–36. DOI 10.34832/ELSV.2020.13.12.003.
4. Чистова Н. А., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Метод формирования цифровых кластеров сетей связи пятого и последующих поколений на основе качества предоставления услуг // Электросвязь. 2020. № 7. С. 51–57. DOI 10.34832/ELSV.2020.8.7.003.
5. Тонких Е. В., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Анализ беспроводной сети Интернета вещей высокой плотности // Электросвязь. 2020. № 1. С. 44–48. DOI 10.34832/ELSV.2020.2.1.006.
6. Молчанов Д. А. Разработка подходов, методов исследования и моделей обеспечения показателей качества обслуживания в беспроводных сетях пятого поколения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.12.13 / Молчанов Дмитрий Александрович. СПбГУТ, 2020. 315 с.
7. Бекман И. Н. Математика диффузии : учебное пособие. М.: Изд-во «ОнтоПринт», 2016. 400 с. ISBN 978-5-906802-47-7.
8. Соколов И. М. Размерности и другие геометрические критические показатели в теории протекания // Успехи физических наук. 1986. Т. 150. №. 10. С. 221–255.
9. Chiu S. N., Stoyan D., Kendall W. S., Mecke J. Stochastic geometry and its applications. John Wiley & Sons, 2013. 583 p.

References

1. Kucheryavyj A. E., Paramonov A. I., Al'-Naggar Ya. M. Seti svyazi s malymi zaderzhkami // Electrosvyaz. 2013. Iss. 12. pp. 15–19 (in Russian).
2. Koucheryavy A. Eu., Borodin A. S., Kirichek R. V. Network 2030 // Electrosvyaz. 2018. Iss. 11. pp. 52–56 (in Russian).
3. Chistova N. A. Methods for determining the dynamic allocation of service points and traffic prediction for ultra-low latency networks // Electrosvyaz. 2020. Iss. 12. pp. 32–36 (in Russian). DOI 10.34832/ELSV.2020.13.12.003.
4. Chistova N. A., Paramonov A. I., Koucheryavy A. E. The method of forming the digital clusters for communication networks of fifth and subsequent generations based on QoS // Electrosvyaz. 2020. Iss. 7. pp. 51–57 (in Russian). DOI 10.34832/ELSV.2020.8.7.003.
5. Tonkikh E. V., Paramonov A. I., Koucheryavy A. E. Analysis of wireless high-density IoT network // Electrosvyaz. 2020. Iss. 1. pp. 44–48. (in Russian). DOI 10.34832/ELSV.2020.2.1.006.
6. Molchanov D. A. Razrabotka podhodov, metodov issledovaniya i modelej obespecheniya pokazatelej kachestva obsluzhivaniya v besprovodnyh setyah pyatogo pokoleniya: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.12.13 / Molchanov Dmitriy Aleksandrovich. SPbGUT, 2020. 315 s. (in Russian).
7. Bekman I. N. Matematika diffuzii : uchebnoe posobie. M.: OntoPrint, 2016. 400 s. (in Russian). ISBN 978-5-906802-47-7.
8. Sokolov I. M. Razmernosti i drugie geometricheskie kriticheskie pokazateli v teorii protekaniya // Uspekhi fizicheskikh nauk. 1986. T. 150. №. 10. S. 221–255. (in Russian).
9. Chiu S. N., Stoyan D., Kendall W. S., Mecke J. Stochastic geometry and its applications. John Wiley & Sons, 2013. 583 p.

Парамонов Александр Иванович

доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций им. проф.
М. А. Бонч-Бруевича, alex-in-spb@yandex.ru

Paramonov Alexander I.

doctor of engineering sciences, docent, professor at the
department, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State
University of Telecommunications,
alex-in-spb@yandex.ru

Бушеленков Сергей Николаевич

аспирант Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, bsn1980@yandex.ru

Bushelenkov Sergey N.

postgraduate, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg
State University of Telecommunications,
bsn1980@yandex.ru