

# ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ UFMC В СЕТЯХ 5G/IMT-2020

И. В. Гришин<sup>1\*</sup>, Н. С. Феденева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация  
\* Адрес для переписки: i.v.grischin@gmail.com

## **Аннотация**

**Предмет исследования.** В статье рассматривается планируемая к внедрению в сетях мобильной связи пятого поколения технология частотного мультиплексирования с универсальной фильтрацией UFMC, позволяющая максимизировать скорость спада боковых лепестков спектра многочастотного сигнала, являющихся причиной внеполосных излучений. **Метод.** В качестве метода исследования был выбран вычислительный эксперимент. **Основные результаты.** Проведено сравнение параметров сигналов OFDM и UFMC с целью определения выигрыша технологии UFMC в занимаемой полосе частот спектра сигнала, а также количества арифметических операций, требуемых на формирование символа данных по сравнению с технологией OFDM, на основе которых сделаны выводы о возможности практического применения технологии UFMC в сетях мобильной связи пятого поколения. **Практическая значимость.** Произведенный анализ может способствовать выбору оптимального количества подканалов в группах с целью минимизации объема вычислений в процессе формирования символов UFMC.

## **Ключевые слова**

5G/IMT-2020, OFDM, UFMC, окно Дольфа-Чебышева.

## **Информация о статье**

УДК 336.743

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 02.10.17, принята к печати 01.12.17.

**Ссылка для цитирования:** Гришин И. В., Феденева Н. С. Перспективы использования технологии UFMC в сетях 5G/IMT-2020 // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Том 5. № 4. С. 16–24.

# PROSPECTS OF USING UFMC TECHNOLOGY IN 5G/IMT-2020 NETWORKS

I. Grishin<sup>1\*</sup>, N. Fedeneva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

\* Corresponding author: i.v.grischin@gmail.com

**Abstract—Research subject.** The article considers the universal filtered multicarrier technology UFMC, planned to be introduced in the mobile communication networks of the fifth generation, which allows to maximize the rate of decay of the side lobes of the spectrum of the multifrequency signal, which are the cause of out-of-band emissions. **Method.** The method of computational experiment was chosen. **Core results.** The parameters of OFDM and UFMC signals were compared to determine the gain of UFMC technology in the occupied bandwidth of the signal spectrum, as well as the number of arithmetic operations required to generate a data symbol in comparison with OFDM technology, on the basis of which conclusions were made about the possibility practical application of UFMC technology in 5th generation mobile communication networks. **Practical relevance.** The analysis carried out can contribute to the selection of the optimal number of subcarriers in groups in order to minimize the amount of computation during the UFMC symbol generation process.

**Keywords**—5G/IMT-2020, OFDM, UFMC, Dolph-Chebyshev window.

## Article info

Article in Russian.

Received 02.10.17, accepted 01.12.17.

**For citation:** Grishin I., Fedeneva N.: Prospects of using UFMC technology in 5G / IMT-2020 networks // Telecom IT. 2017. Vol. 5. Iss. 4. pp. 16–24 (in Russian).

Развитие информационных технологий привело к значительным изменениям во всех областях человеческой деятельности, что в свою очередь приводит к непрерывному увеличению объёмов трафика [1, 2]. Более того планируется, что значительную долю данного трафика составит обмен данными межмашинного взаимодействия. С учётом всех новых задач, которые встают в области телекоммуникаций, становится очевидной необходимость перехода к новым стандартам в сетях подвижной связи [3, 4]. И на текущее время стандарт сетей связи пятого поколения уже находится на стадии сертификации. Утверждение данного стандарта планируется осуществить в 2020 г., после согласования диапазонов частот на Всемирной конференции радиосвязи и получения положительного решения от Международного союза электросвязи. Однако уже сейчас можно ознакомиться с черновиком данного стандарта, опубликованного на сайте МСЭ<sup>1</sup>. Согласно данным, представленным в черновике стандарта IMT-2020, скорости

---

<sup>1</sup> Draft new Report ITU-R M. [IMT-2020.TECH PERF REQ] – Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s). URL: <https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0040/en>

нисходящего и восходящего цифровых потоков составят 10 и 20 Гбит/с соответственно, для конечного пользователя заявлены скорости нисходящего и восходящего потоков 100 и 50 Мбит/с.

На первом этапе организация сетей пятого поколения планируется на основе существующей архитектуры сетей четвёртого поколения, которые постепенно будет дополняться новейшими разработками радиодоступа [5]. В существующих сетях беспроводного доступа четвёртого поколения для передачи данных используется технология ортогонального частотного мультиплексирования OFDM. Несмотря на бесспорные достоинства данной технологии, следует отметить и ряд недостатков, например: необходимость высокоточной синхронизации по времени и частоте, чувствительность к доплеровскому эффекту, высокие значения пик-фактора. Следует также отметить довольно широкую полосу частот, в которой наблюдаются побочные радиоизлучения сигнала OFDM выше заданного уровня.

В то же время повышение спектральной эффективности является довольно сложной задачей. Однако уже имеется несколько решений, которые наряду с классической OFDM лягут в основу передачи данных в сетях связи пятого поколения. В данной статье будет рассмотрена одна из таких технологий: universal filtered multicarrier (UFMC).

Принцип технологии UFMC заключается в максимизации скорости спада боковых лепестков спектра многочастотного сигнала на выходе блока преобразования Фурье с помощью КИХ фильтров, весовые коэффициенты которых соответствуют оконной функции Дольфа-Чебышева [6].

Выражение, описывающее в общем виде принцип формирования  $i$ -го символа OFDM на передающей стороне, имеет вид:

$$\dot{\mathbf{x}}_{cp}^i = \frac{1}{\sqrt{N}} \mathbf{A} \mathbf{W}^H \dot{\mathbf{X}}^i = \mathbf{A} \dot{\mathbf{x}}^i,$$

где  $\dot{\mathbf{X}}^i$  –  $i$ -й комплексный кадр данных длительности  $N$ ,  $\mathbf{W}^H = (\mathbf{W}^T)^* - N \times N$  – матрица обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ),  $\arg^*$  – оператор комплексного сопряжения,  $\dot{\mathbf{x}}^i$  – последовательность  $N$ -точечного ОДПФ  $\dot{\mathbf{X}}^i$ ,  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{M \times N-M} & \mathbf{I}_M \\ \hline \mathbf{I}_N & \end{bmatrix}$  – блочная матрица добавления циклического префикса, по-

средством копирования последних  $M$  отсчётов  $\dot{\mathbf{x}}^i$  во временное окно между последовательностями  $\dot{\mathbf{x}}^{i-1}$  и  $\dot{\mathbf{x}}^i$ . Далее символ  $\dot{\mathbf{x}}^i$  поступает на цифро-аналоговый преобразователь, где формируется сигнал OFDM:

$$x^i(t) = \operatorname{Re} \left( \sum_{n=1}^N x_n^i \cdot h_{\text{ЦАП}}(t - n\Delta t) \right) \cos(2\pi f_n t),$$

где  $h_{\text{ЦАП}}(t)$  – импульсная характеристика ЦАП.

Следует отметить свойство симметрии элементов матрицы ОДПФ  $\omega_{m,n}^* = \exp\left(2i\pi \frac{m \cdot n}{N}\right)$ , где  $m, n = 0 \dots N-1$  – номера строки и столбца матрицы  $\mathbf{W}^H$ :  $\text{Re}(\omega_{m,n}^*) = \text{Re}(\omega_{N-m,n}^*)$ ,  $\text{Im}(\omega_{m,n}^*) = \text{Im}(\omega_{N-m,n}^*)$  для  $\forall m = 1 \dots (N/2)-1$ . Свойство симметрии справедливо и для  $n$ . Таким образом для организации передачи на  $N$  поднесущих необходимо увеличение размеров матрицы  $\mathbf{W}^H$  до  $2N$ , что позволяет, тем не менее формировать на выходе блока ОДПФ вещественный сигнал за счёт эрмитова расширения комплексного кадра данных:  $\dot{\mathbf{X}}_{N-n}^i = (\dot{\mathbf{X}}_n^i)^*$ ,  $\forall n = 1 \dots (N/2)-1$ . Пример символа OFDM для  $N = 256$  и  $M = N/8$  и его спектр представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, уровень спектральных составляющих, выходящих за пределы отведённой под передачу полосы частот и оказывающих влияние на передачу сигналов в смежных каналах, достаточно высок.

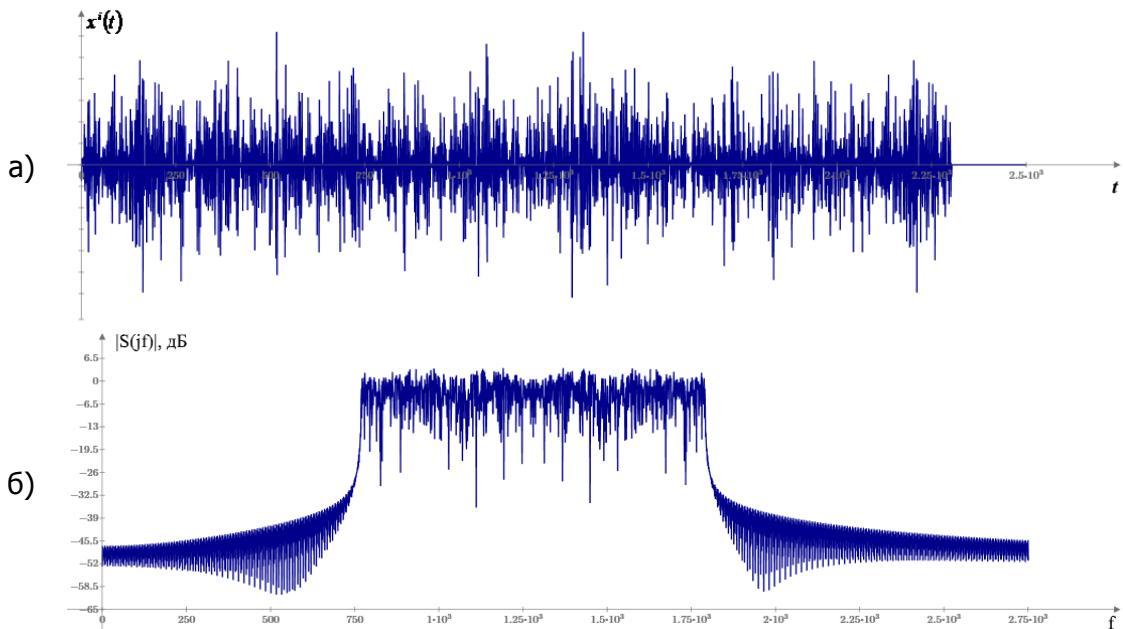


Рис. 1. Уровень спектральных составляющих:  
а) символ OFDM; б) амплитудный спектр сигнала OFDM

В рассматриваемой в данной статье технологии UFMC сигналы QAM  $N$  подканалов разбиваются на  $G$  групп. Комплексный кадр данных каждой такой группы на позициях сигналов QAM, не попадающих в частотный диапазон данной группы, содержит нулевые элементы. Комплексные кадры данных групп поступают на отдельные блоки  $N$  точечного ОДПФ, на выходе которых устанавливаются КИХ фильтры с импульсными характеристиками, описываемыми выражениями [7]:

$$h_g^l = \left( \sum_{k=0}^l \frac{(-1)^l (L-k-2)! \text{ch}(\text{arch}(10^\alpha)/N)}{(L-l-k-1)! k! (l-k)!} \right) \cos\left(\frac{2\pi N \cdot g \cdot l}{G \cdot L}\right),$$

где  $g$  – номер группы поднесущих  $0 \dots G-1$ ,  $L$  – длина фильтра (нечётная), выбираемая в пределах  $0,07 \dots 0,1$  величины  $N$ , что соизмеримо с длиной циклического префикса<sup>2</sup>.

На рис. 2 представлены импульсные характеристики КИХ фильтров для 0, 7 и 15 групп для  $G = 16$ , а также их спектральные характеристики для  $L = 17$ ,  $N = 256$ , вносимое затухание боковых лепестков – 80 дБ.

Формирование  $i$ -го символа данных UFMC как функцию дискретного времени можно описать следующим выражением:

$$\dot{x}_{ufmc}^i = \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{g=0}^{G-1} \mathbf{H}_g \mathbf{W}^H \mathbf{D}_g \dot{\mathbf{X}}^i = \sum_{g=0}^{G-1} \dot{x}_g^i$$

где  $\mathbf{D}_g = \text{diag} \{d_0, d_1 \dots d_{2N-1}\}$  – матрица формирования комплексного кадра данных группы, где  $d_n = 1$ , если  $n$  – один из номеров подканалов, входящих в данную группу, и  $d_n = 0$  в противном случае.  $\mathbf{H}_g$  –  $(2N + L-1) \times 2N$  матрица аperiодической свёртки сигнала с выхода блока ОДПФ и отсчётами оконной функции Дольфа-Чебышева,  $\dot{x}_g^i$  – символ данных группы  $g$ .

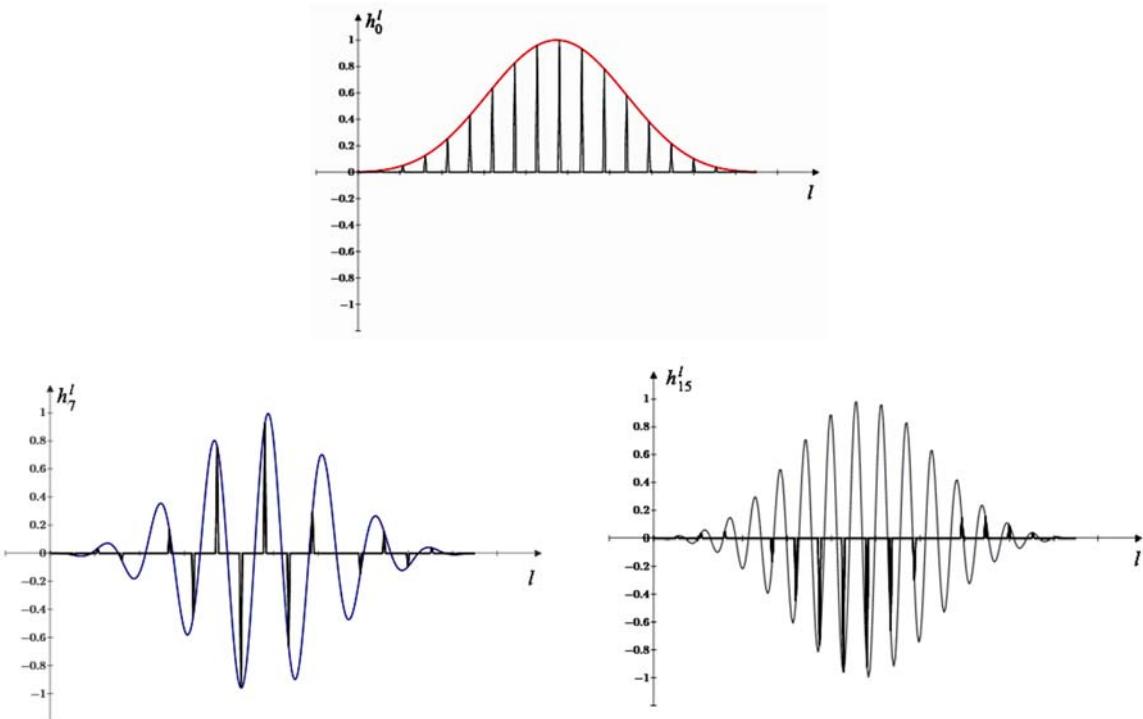


Рис. 2. Импульсные характеристики КИХ фильтров для групп  $g = 0, 7, 15$

<sup>2</sup> 5G Waveform Candidate Selection D 3.1. 2015. URL: [http://5gnow.eu/wp-content/uploads/2015/04/5GNOW\\_D3.2\\_final.pdf](http://5gnow.eu/wp-content/uploads/2015/04/5GNOW_D3.2_final.pdf)

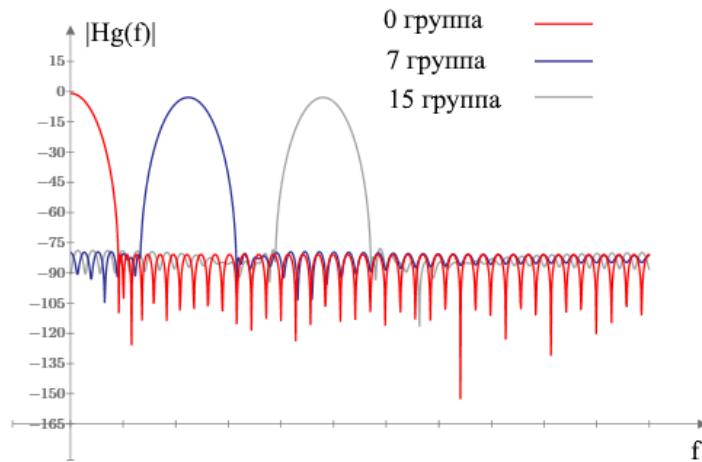


Рис. 3. Спектральные характеристики КИХ фильтров для групп  $g = 0, 7, 15$

Символ данных UFMC далее поступает на ЦАП и преобразователь частоты, осуществляющий перенос спектра сигнала UFMC в высокочастотный диапазон.

На рис. 4 представлены амплитудные спектры соответствующих групп на выходе преобразователя частоты.

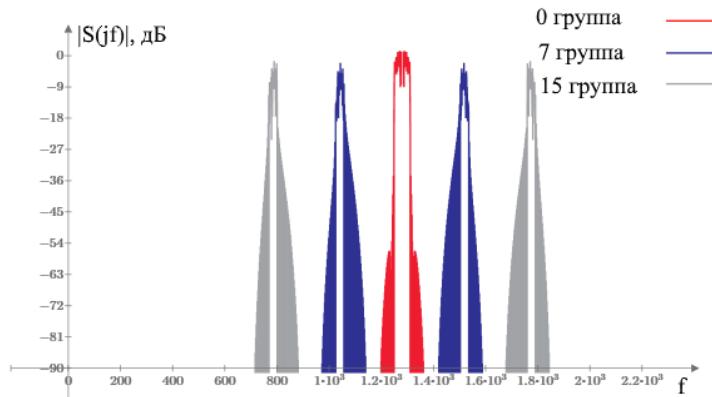


Рис. 4. Амплитудные спектры групп на выходе преобразователя частоты

На рис. 5 приведены амплитудные спектры сигналов OFDM и UFMC, образованные из одного комплексного кадра данных  $\dot{\mathbf{X}}^i$ .

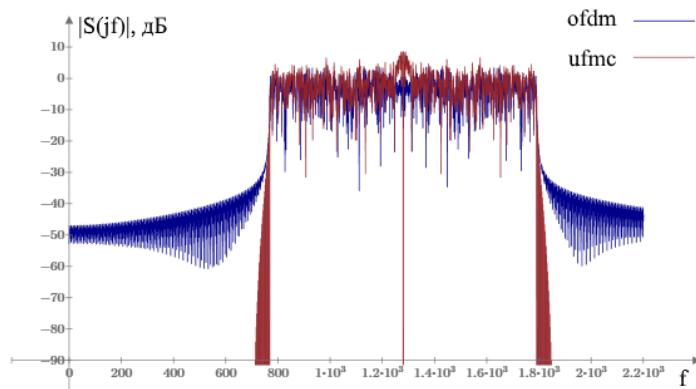


Рис. 5. Амплитудные спектры сигналов OFDM и UFMC

Из рис. 5 видно, что технология UFMC эффективно устраняет внеполосные излучения. Так, если определять ширину занимаемой полосы частот спектров сигналов по уровню внеполосного излучения  $-40$  дБ, то выигрыш UFMC по занимаемой полосе частот составляет более 1,2.

В то же время стоит обратить внимание на количество вычислений, требуемых на формирование символов OFDM и UFMC. Если для формирования символа OFDM на практике необходимо выполнить процедуру ОБПФ, требующую с учётом эрмитовой симметрии  $N \log_2(2N)$  операций комплексного умножения и  $2N \log_2(2N)$  комплексного сложения, то для формирования символа UFMC процедур ОБПФ требуется в  $G$  раз больше и, следовательно, в  $G$  раз больше вычислений. Последующая свёртка вещественной выходной последовательности блока ОБПФ с импульсной характеристикой КИХ фильтра группы длины  $L$  требует  $G(2N + L - 1)L$  умножений и  $G(2N + L - 1)(L - 1)$  сложений [8]. Также требуется осуществить  $G(2N + L - 1)$  операций сложения отсчётов символов данных групп. На рисунке 6 представлен график, отображающий зависимость количества арифметических операций, требуемых для формирования символов OFDM и UFMC, от количества подканалов  $N$ . Расчёты UFMC символа производились для случая 16 подканалов в группе и длине фильтра  $L = 0.07$  ( $2M$ ). Как видно из графиков количество арифметических операций, требуемых для формирования символа UFMC как минимум на четыре порядка превышает количество операций, требуемых для формирования символа OFDM.

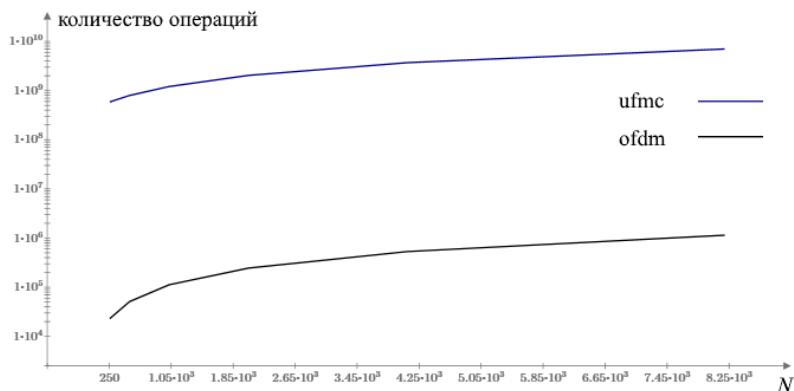


Рис. 6. Зависимость количества арифметических операций, требуемых для формирования символов OFDM и UFMC, от количества подканалов  $N$

Можно сделать вывод о том что, не смотря на преимущества в плане экономии занимаемой под передачу полосы частот, технология UFMC требует несопоставимо больших объемов вычислений, что в значительной степени может осложнить практическую реализацию данной технологии, особенно с учётом тех скоростей передачи, которые планируется предоставлять конечным пользователям.

### Литература

1. Кучеряный А. Е. Интернет Вещей // Электросвязь. 2013. № 1. С. 21–24.
2. Volkov A., Khakimov A., Muthanna A., Kirichek R., Vladyko A., Koucheryavy A. Interaction of the IoT traffic generated by a smart city segment with SDN core network // Lecture Notes in Computer Science. 2017. Vol. 10372. pp. 115–126.

3. Мухизи С., Киричек Р. В. Анализ возможностей применения SDN/NFV в мобильных сетях 5G // Молодежная научная школа по прикладной теории вероятностей и телекоммуникационным технологиям (АРТСТ). 2017. С. 166–174.
4. Кучеряный А. Е., Прокопьев А. В., Кучеряный Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: Любавич, 2011. 312 с.
5. Рагимова С. Жажда скорости. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3006299>
6. Vakilian V., Wild T., Schaich F., Brink S., Frigon J.-F. Universal-Filtered Multi-Carrier Technique for Wireless Systems Beyond LTE // IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). 2013. pp. 223–228.
7. Дворкович А. В., Дворкович В. П. Оконные функции для гармонического анализа сигналов. М.: Техносфера, 2014. 112 с.
8. Айфичер Э., Джервис. Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. 2-е изд. М.: Вильямс, 2004. 992 с.

### References

1. Koucheryavy A. Internet of Things // Electrosvyaz'. 2013. No. 1. pp. 21–24.
2. Volkov A., Khakimov A., Muthanna A., Kirichek R., Vladyko A., Koucheryavy A. Interaction of the IoT traffic generated by a smart city segment with SDN core network // Lecture Notes in Computer Science. 2017. Vol. 10372. pp. 115–126.
3. Muhizi S., Kirichek R. Analysis of the Possibilities of using SDN & NFV in 5G Mobile Networks // 2nd International School on Applied Probability Theory & Communications Technologies (АРТСТ). 2017. pp. 166–174.
4. Koucheryavy A., Prokopiev A., Koucheryavy Y. Self-Organizing Networks. SPb.: Lyubavich. 2011. 312 p.
5. Ragimova S. Need for Speed. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3006299>
6. Vakilian V., Wild T., Schaich F., Brink S., Frigon J.-F. Universal-Filtered Multi-Carrier Technique for Wireless Systems Beyond LTE // IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). 2013. pp. 223–228.
7. Dvorkovich A., Dvorkovich V. Window Functions for the Harmonic Analysis of Signals. M.: Tekhnosfera. 2014. 112 p.
8. Ifeachor E., Jervis. B. Digital Signal Processing: A Practical Approach (2nd Edition). Prentice Hall. 2001. 960 p.

**Гришин Илья Владимирович**

– кандидат технических наук, доцент, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, i.v.grischin@gmail.com

**Феденева Надежда Сергеевна**

– студентка, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, fedeneva\_n@yandex.ru

**Grishin Iliya**

– Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, i.v.grischin@gmail.com

**Fedeneva Nadezhda**

– Student, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, fedeneva\_n@yandex.ru