

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.396.49
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-35-40>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Коэффициент оперативной готовности спутниковых сетей связи

Т.Э. Гельфман[@], А.П. Пирхавка

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: gelfman@mirea.ru

Резюме

Цели. Важнейшим отличительным признаком спутниковых сетей связи (ССС) является топология, характеризующая схему объединения узлов и каналов связи в единую структуру и во многом определяющая основные характеристики систем связи. В СССР используются следующие топологии: полносвязная, древовидная, кольцевая и радиальная (типа «звезда»). Топологию можно изменять в зависимости от решаемых задач, например, для обеспечения высоких показателей надежности. Общим, наиболее часто применяемым показателем, характеризующим надежность сетей связи, является коэффициент готовности. Рассматривая СССР как сложную восстанавливаемую систему, целесообразно наряду с коэффициентом готовности анализировать коэффициент оперативной готовности. В работе исследуется влияние топологии сети на надежность СССР.

Методы. Используется теория массового обслуживания для анализа потока событий, то есть потока отказов и восстановлений.

Результаты. Полагая, что для центрального узла при радиальной топологии сети можно использовать экспоненциальную модель наработки до отказа, получены зависимости коэффициента оперативной готовности от времени. Выполнено сравнение надежности сетей с кольцевой и радиальной топологией по коэффициенту оперативной готовности.

Выводы. Показано, что для достижения более высокой надежности необходимо использовать СССР с радиальной структурой. Например, на интервале времени 12000 часов коэффициент оперативной готовности двухузловой СССР с радиальной структурой равен 0.9, а для СССР с кольцевой топологией при количестве узлов 2, 3, 4 соответственно равен 0.7, 0.59, 0.5. Исследование также показало, что радиальная топология эффективнее даже при менее надежных узлах, то есть при увеличении интенсивности отказов. Преимущество радиальной топологии сети возрастает по мере увеличения числа узлов. Однако в СССР с радиальной топологией выход из строя центрального узла приводит к полной деградации всей системы.

Ключевые слова: надежность, спутниковая связь, сеть связи, топология сети, коэффициент оперативной готовности

• Поступила: 30.09.2021 • Доработана: 31.10.2021 • Принята к опубликованию: 07.12.2021

Для цитирования: Гельфман Т.Э., Пирхавка А.П. Коэффициент оперативной готовности спутниковых сетей связи. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):35–40. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-35-40>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

The operational readiness factor of satellite communication networks

Tatyana E. Gelfman[®], Aleksei P. Pirkhavka

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: gelfman@mirea.ru

Abstract

Objectives. The most important distinguishing feature of satellite communication networks (SCNs) is topology, which consolidates the scheme for combining nodes and communication channels into a single structure and largely determines the main characteristics of communication systems. The following topologies are used in SCNs: fully connected, tree-like, ring-shaped, and radial ("star" type). The topology can be changed depending on the tasks being solved; for example, to ensure high reliability rates. The most frequently used indicator characterizing the reliability of communication networks is the readiness factor. Considering the SCN as a complex recoverable system, it is advisable to analyze the operational readiness factor along with the readiness factor. This paper investigates the influence of the network topology on the reliability of the SCN.

Methods. Queuing theory was used to analyze the flow of events, that is, the flow of failures and recoveries.

Results. Assuming that the exponential Mean Time Between Failures (MTBF) model can be used for a central node with a radial network topology, the time dependences of the operational readiness factor were obtained. The reliability of networks with ring and radial topology was compared in terms of the operational readiness factor.

Conclusions. To achieve a higher reliability, it is necessary to use an SCN with a radial structure. For example, on a time interval of 12000 h, the operational readiness factor of a two-node SCN with a radial structure is 0.9, and for an SCN with a ring topology with the number of nodes 2, 3, 4, it is 0.7, 0.59, and 0.5, respectively. The study also showed that radial topology is more efficient even with less reliable nodes, that is, with higher failure rates. The advantage of a radial network topology increases as the number of nodes increases. However, in an SCN with a radial topology, failure of the central unit leads to complete degradation of the entire system.

Keywords: reliability, satellite communication, communication network, network topology, operational readiness factor

• Submitted: 30.09.2021 • Revised: 31.10.2021 • Accepted: 07.12.2021

For citation: Gelfman T.E., Pirkhavka A.P. The operational readiness factor of satellite communication networks. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):35–40. <https://doi.org/10.32362/2500316X-2022-10-1-35-40>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Повысить надежность спутниковых сетей связи (ССС) в процессе эксплуатации чрезвычайно сложно. Это объясняется тем, что надежность в основном закладывается при проектировании сетей и изготовлении оборудования, а при эксплуатации надежность только снижается [1, 2]. Скорость снижения надежности зависит от методов эксплуатации, квалификации обслуживающего персонала, условий эксплуатации.

Существуют эффективные методы повышения надежности сетей связи:

- резервирование [3, 4],
- упрощение системы,
- применение наиболее надежных элементов,
- стандартизация и унификация элементов и узлов,
- встроенный контроль,
- автоматизация проверок.

Эффективность этих методов состоит в том, что они позволяют из малонадежных элементов строить надежные системы. Эти методы позволяют уменьшить интенсивность отказов системы, уменьшить среднее время восстановления и увеличить время непрерывной работы системы. Вопросы оценки надежности сетей связи и анализ эффективности методов

повышения надежности являются актуальными для инфокоммуникационных сетей связи [5–9].

Общим показателем, характеризующим надежность любого оборудования (в том числе сетей связи), является коэффициент готовности – предел мгновенного коэффициента готовности при стремлении рассматриваемого момента времени к бесконечности. Мгновенный коэффициент готовности (функция готовности) – это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в данный момент времени¹. Коэффициент готовности является одним из основных показателей надежности сети связи [10]. При формировании требований к показателям надежности сетей связи коэффициент готовности обычно нормируется [11].

Рассматривая ССС как сложную восстанавливаемую систему, целесообразно наряду с коэффициентом готовности анализировать коэффициент оперативной готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени¹.

Коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$ определяется по формуле [1]:

$$K_{ог}(t) = K_r P(t), \quad (1)$$

где K_r – коэффициент готовности; $P(t)$ – вероятность безотказной работы системы за время t при условии, что система готова к работе в произвольный момент.

Важнейшим отличительным признаком сети связи является топология сети², свойства которой можно изменять в процессе функционирования в зависимости от решаемых задач, например, задачи обеспечения высоких показателей надежности [12]. В ССС используются следующие топологии сети [13].

Полносвязная топология обеспечивает наиболее высокую надежность функционирования ССС, так как при отказе выделенного канала связи информация может передаваться по обходным путям через промежуточные узлы. Однако реализация подобной технологии требует организации непосредственной

связи между всеми узлами, что ведет к удорожанию ССС.

Древовидная топология отличается низкой надежностью, так как отказ даже одного из каналов связи может привести к расчленению сети на две изолированные подсети. Поэтому наиболее часто применяют кольцевую и радиальную топологии.

Кольцевая топология (рис. 1а), как и древовидная, имеет низкую надежность, так как отказ любого одного канала приводит к отказу сети. Однако за счет резервирования можно повысить надежность кольцевой топологии применением множественных колец.

Радиальная топология (типа «звезда») (рис. 1б) обладает достаточно высокой надежностью по сравнению с другими топологиями, так как периферийные узлы функционируют независимо друг от друга. Отказ центрального узла приводит к отказу всей сети. Поэтому необходимо применять резервирование этого узла.

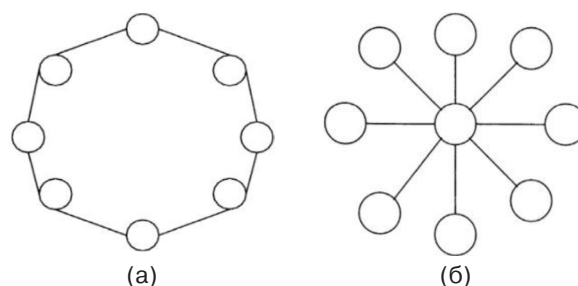


Рис. 1. Основные топологии ССС:
(а) кольцевая; (б) радиальная («звезда»)

При отказе узла или канала связи система должна автоматически восстанавливаться в установленное (обычно очень короткое) время. При этом должен задействоваться один из резервных маршрутов доставки данных от отправителя к получателю. Резервирование каналов связи позволяет свести к минимуму задержки в передаче данных, одновременно серьезно увеличивая значения параметров работоспособности системы на отказ.

Сравним надежность кольцевой и радиальной топологий по коэффициенту оперативной готовности.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОПЕРАТИВНОЙ ГОТОВНОСТИ ССС СО СТРУКТУРОЙ «ЗВЕЗДА»

ССС с радиальной топологией работоспособна, если работает хотя бы один периферийный узел при работающем центральном узле. При выходе из строя всех узлов либо центрального узла сеть неработоспособна.

В качестве примера ССС со структурой «звезда» рассмотрим сеть, состоящую из центрального узла и 2 периферийных узлов. Тогда коэффициент

¹ ГОСТ 27.002–2015. *Надежность в технике. Термины и определения*. М.: Стандартинформ; 2016. 30 с. [GOST 27.002–2015. *Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya (Dependability in technics. Terms and definitions)*. Moscow: Standartinform; 2016. 30 p. (in Russ.).]

² Гольдштейн Б.С., Соколов Н.А., Яновский Г.Г. *Сети связи: учебник для ВУЗов*. СПб.: БХВ-Петербург; 2010. 400 с. ISBN: 978-5-9775-0474-4 [Gol'dshtein B.S., Sokolov N.A., Yanovskii G.G. *Communication networks: textbook for universities*. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2010. 400 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-9775-0474-4]

оперативной готовности определяется по основной структурной схеме надежности выражением [1]:

$$K_{\text{ог звезда}}(t) = \frac{2T_0}{T_B + 2T_0} P_{\text{цу}}(t) [2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}], \quad (2)$$

где $T_0 = \frac{1}{\lambda}$ – наработка на отказ периферийного узла; $T_B = \frac{1}{\mu}$ – среднее время восстановления периферийного узла; $P_{\text{цу}}(t)$ – вероятность безотказной работы центрального узла; λ – интенсивность отказа периферийного узла; μ – интенсивность восстановления периферийного узла.

Полагая, что для центрального узла можно использовать экспоненциальную модель наработки до отказа, выражение (2) приведем к следующему виду:

$$K_{\text{ог звезда}}(t) = \frac{2T_0}{T_B + 2T_0} e^{-\lambda_{\text{цу}} t} [2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}], \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{цу}}$ – интенсивность отказа центрального узла. Обычно центральный узел более надежен, чем периферийные узлы, поэтому положим $\lambda_{\text{цу}} = \lambda/2$.

Зависимость $K_{\text{ог звезда}}(t)$ для $\mu = 0.04$ и различных значений λ ($1.5 \cdot 10^{-5}$, $2.5 \cdot 10^{-5}$ и $5 \cdot 10^{-5}$) построена на рис. 2.

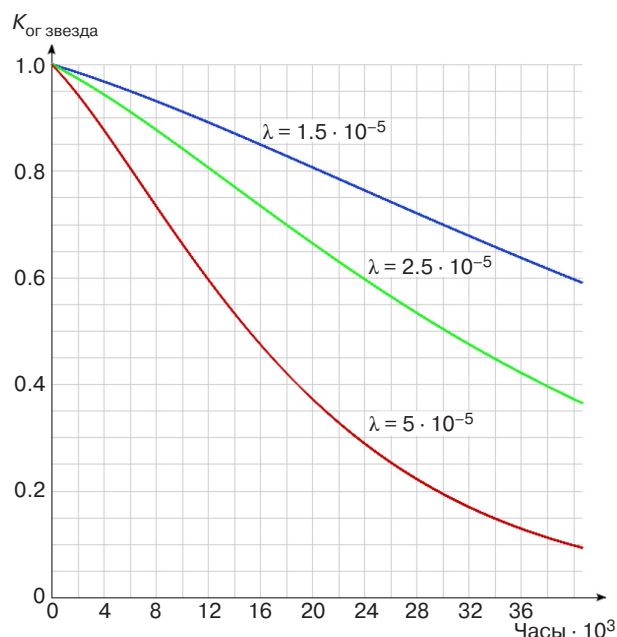


Рис. 2. Коэффициент оперативной готовности CCC с радиальной топологией

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОПЕРАТИВНОЙ ГОТОВНОСТИ CCC С КОЛЬЦЕВОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

CCC с кольцевой топологией работоспособна, если исправны все узлы, что соответствует последовательной модели надежности. При выходе из строя одного из узлов сеть неработоспособна.

Коэффициент оперативной готовности CCC со структурой «кольцо» определяется выражением [1]:

$$K_{\text{ог кольцо}}(t) = \frac{T_0}{T_B + T_0} e^{-n\lambda t}, \quad (4)$$

где n – количество узлов.

Зависимость $K_{\text{ог кольцо}}(t)$ для $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$, $\mu = 0.04$ и количества узлов $n = 2, 3, 4$ представлена на рис. 3.

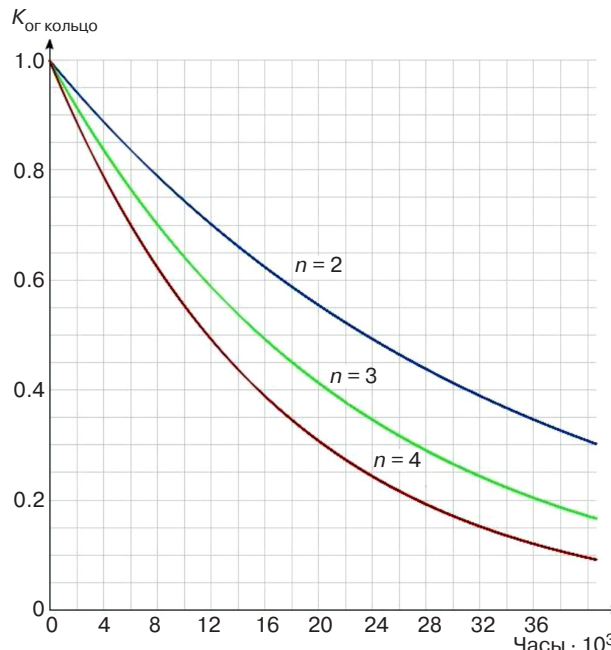


Рис. 3. Коэффициент оперативной готовности CCC с кольцевой топологией

Из зависимостей рис. 2 и рис. 3 следует, что для достижения более высокой надежности необходимо использовать CCC со структурой «звезда». Например, при $t = 12000$ часов коэффициент оперативной готовности сети с радиальной структурой равен 0.9, а для CCC с кольцевой топологией при $n = 2, 3, 4$ соответственно равен 0.7, 0.59, 0.5.

ВЫВОДЫ

Коэффициент оперативной готовности характеризует вероятность нахождения сети в работоспособном состоянии в течение заданного интервала времени, начиная с определенного момента времени. Выполненное сравнение кольцевой и радиальной топологий CCC по коэффициенту оперативной готовности показало, что радиальная топология даже при менее надежных узлах обеспечивает для любых интервалов времени более высокую надежность по сравнению с кольцевой топологией. Преимущество радиальной топологии сети возрастает по мере увеличения числа узлов.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ямпурин Н.П., Баранова А.В. *Основы надежности электронных средств*. М.: Академия; 2010. 240 с. ISBN: 978-5-7695-5908-2
2. Гельфман Т.Э., Калмыков М.Н., Сердитов А.А., Чуев Е.А., Богачев В.Н., Харитонов А.Ю. Надежность систем космической связи. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2012». 2012. Ч. 6. С. 157–161. URL: <https://conf.mirea.ru/CD2012/pdf/p6/35.pdf>
3. Гельфман Т.Э., Гнучев О.Е., Лобынцев Р.Ю. Методы резервирования спутниковых систем связи. *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем «Радиоинфоком – 2017»*. Сб. научных трудов III Международной научно-практической конференции. М.: Московский технологический университет (МИРЭА); 2017. С. 366–374.
4. Кислаев А.Г., Хропов А.Н. Оптимальное резервирование, как метод повышения надежности систем космической связи. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2010». 2010. Ч. 1–3. С. 109–112. URL: <https://conf.mirea.ru/CD2010/pdf/p3/26.pdf>
5. Шерстнева О.Г. Определение показателей структурной надежности сети связи. *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2020;72:48–54. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2020-72-48-54>
6. Туляков Ю.М., Пронин А.В. Параметрическая взаимосвязь надежности подвижной радиосвязи с устойчивостью сети связи. *Проектирование и технология электронных средств*. 2020;4:3–10.
7. Фархадов М.П., Блинова О.В., Васьковский С.В. Оценка надежности системы связи с подвижными узлами. *Датчики и системы*. 2018;5(225):3–8.
8. Королев П.С., Седов К.Д., Соснин А.И. Разработка программного комплекса для расчета количественных характеристик показателей надежности составных частей систем спутниковой связи. *XII Международная научно-техническая конференция «Технологии информационного общества»*. М.: Медиа Паблишер; 2018. Т. 1. С. 187–188.
9. Михайлов М.Ю. Методика оценки и повышения надежности функционирования узлов электросвязи мультисервисных инфокоммуникационных сетей связи. *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли*. 2012;4(2):20–22.
10. Давыдов А.Е., Смирнов П.И., Парамонов А.И. *Проектирование телекоммуникационных систем и сетей. Раздел Коммутируемые сети связи. Расчет параметров сетей связи и анализ трафика*. СПб.: Университет ИТМО; 2016. 47 с.
11. Лейбов А.З., Майзульс Р.А., Шавдия Ю.Д. Нормирование показателей надежности сетей цифрового телевизионного вещания. *Broadcasting. Телевидение и радиовещание*. 2014;3:24–28. URL: <http://lib.broadcasting.ru/articles2/Regandstan/normirovanie-pokazateley-nadezhnosti-setey-tsifrovogo-televizionnogo-veschaniya>

REFERENCES

1. Yampurin N.P., Baranova A.V. *Osnovy nadezhnosti elektronnykh sredstv (Fundamentals of reliability of electronic means)*. Moscow: Akademiya; 2010. 240 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-7695-5908-2
2. Gelfman T.E., Kalmykov M.N., Serditov A.A., Chuev E.A., Bogachev V.N., Kharitonov A.Yu. Reliability of space communication systems. *Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction*. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “INTERMATIC – 2012”. 2012. Vol. 6. P. 157–161 (in Russ.). Available from URL: <https://conf.mirea.ru/CD2012/pdf/p6/35.pdf>
3. Gelfman T.E., Gnuchev O.E., Lobytsev R.Yu. Reservation methods satellite communication systems. *Actual Problems and Prospects of Development of Radioengineering and Infocommunication Systems*. Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference. Moscow: Moscow Technological University (MIREA); 2017. P. 366–374 (in Russ.).
4. Kislav A.G., Khropov A.N. Optimal redundancy as a method for improving the reliability of space communication systems. *Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction*. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “INTERMATIC – 2010”. 2010. Vol. 1–3. P. 109–112 (in Russ.). Available from URL: <https://conf.mirea.ru/CD2010/pdf/p3/26.pdf>
5. Sherstneva O.G. Determination of indicators for communication network structural reliability. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*. 2020;72:48–54 (in Russ.). <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2020-72-48-54>
6. Tulyakov Yu.M., Pronin A.V. Parametric relationship between mobile radiocommunication reliability and communication network stability. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and Technology of Electronic Means*. 2020;4:3–10 (in Russ.).
7. Farkhadov M.P., Blinova O.V., Vas'kovskii S.V. Methodology to estimate reliability of communication system with movable nodes. *Datchiki i sistemy = Sensors & Systems*. 2018;5(225):3–8 (in Russ.).
8. Korolev P.S., Sedov K.D., Sosnin A.I. Development of a software package for calculating quantitative characteristics of reliability indicators of components of satellite communication systems. *XII International Industrial Scientific and Technical Conference “Technologies of the Information Society.”* Moscow: Media Publisher; 2018. V. 1. P. 187–188 (in Russ.).
9. Mikhailov M.Yu. Technique of assessment and reliability augmentation of nodes functioning of multiservice electric communication in communication networks. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = High Tech in Earth Space Research*. 2012;4(2):20–22 (in Russ.).
10. Davydov A.E., Smirnov P.I., Paramonov A.I. *Proektirovanie telekommunikatsionnykh sistem i setei. Razdel Kommutiruemye seti svyazi. Raschet parametrov setei svyazi i analiz trafika (Design of telecommunication*

12. Богатырев В.А., Богатырев А.В. Оценка надежности и выбор сетевой структуры с учетом отказов узлов и связей. В сб.: *Информационные технологии цифровой экономики*. СПб.: СПбГЭУ; 2017. С. 20–24.
13. Камнев В.Е., Черкасов В.В., Чечин Г.В. *Спутниковые сети связи*. М.: Военный парад; 2010. 608 с. ISBN: 978-5-902975-19-9
11. Leibov A.Z., Maizul's R.A., Shavdiya Yu.D. Rationing of reliability indicators of digital television broadcasting networks. *Broadcasting. Televidenie i radioveshchanie = Broadcasting. Television and Radio Broadcasting*. 2014;3:24–28 (in Russ.). Available from URL: <http://lib.broadcasting.ru/articles2/Regandstan/normirovanie-pokazateley-nadezhnosti-setey-tsifrovogo-televizionnogo-veschaniya>
12. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. Reliability assessment and selection of the network structure taking into account the failures of nodes and connections. In: *Information Technologies of the Digital Economy*. St. Petersburg: SPBGEU; 2017. P. 20–24 (in Russ.).
13. Kamnev V.E., Cherkasov V.V., Chechin G.V. *Sputnikovye seti svyazi (Satellite communication networks)*. Moscow: Voennyi parad; 2010. 608 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-902975-19-9

Об авторах

Гельфман Татьяна Элевна, доцент кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: gelfman@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8302-6999>

Пирхавка Алексей Петрович, к.т.н., доцент кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: pirkhavka@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2460-7507>

About the authors

Tatyana E. Gelfman, Associate Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: gelfman@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8302-6999>

Aleksei P. Pirkhavka, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: pirkhavka@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2460-7507>