

Труды МАИ. 2021. № 121

TrudyMAI, 2021, no. 121

Научная статья

УДК 621.396

DOI: [10.34759/trd-2021-121-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-16)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ СМЕСИ РАДИОИМПУЛЬСА И УЗКОПОЛОСНОГО ШУМА ЧЕРЕЗ ФАЗОВЫЙ ДЕТЕКТОР

Александр Германович Ильин¹, Али Салах Хафаджа²✉

^{1,2}Казанский Национальный Исследовательский Технический университет
им. А. Н. Туполева - КАИ),

Казань, Россия, Республика Татарстан

¹iag29@yandex.ru

²alisalaelect1985@gmail.com✉

Аннотация. В статье рассматривается возможность использования структурных отличий смеси полезного сигнала и шума и просто шума для приема слабых сигналов в системах передачи цифровой информации. В работе показано, что для использования структурных отличий для задачи обнаружения радиоимпульса на фоне шумов и помех необходимо использовать нелинейное преобразование. Одним из технических решений является использование фазового детектора. Показана возможность использования результатов исследования для создания двухканальных приемных устройств с повышенной помехозащищенностью для передачи цифровых сигналов. Показана возможность существенного повышения помехоустойчивости приемного устройства за счет применения дополнительного канала приема с

использованием фазового детектора. Данный способ приема сигнала может успешно использоваться в районах, удаленных от городов, где нет развитой структуры интернет связи, однако задача передачи цифровой стоит достаточно остро. В качестве примера области использования маломощных систем передачи цифровой информации, можно привести области народного хозяйства, входящие в государственные программы, такие как «дальневосточный гектар» и аналогичные целевые программы, финансируемые из местных бюджетов областей и регионов Российской Федерации.

Ключевые слова: фазовый детектор, помехоустойчивость, радиоимпульс, узкополосный шум

Для цитирования: Ильин А.Г., Хафаджа А.С. Исследование прохождения смеси радиоимпульса и узкополосного шума через фазовый детектор // Труды МАИ. 2021. № 121. DOI: [10.34759/trd-2021-121-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-16)

STUDY OF THE PASSAGE OF A MIXTURE OF A RADIO PULSE AND NARROWBAND NOISE THROUGH A PHASE DETECTOR

Alexandr G. Ilyin¹, Ali S. Khafaga²✉

^{1,2}Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev,
Kazan, Russia

¹iag29@yandex.ru

²alisalaelect1985@gmail.com✉

Abstract. The article considers the possibility of applying structural dissimilarities between the mixture of valid signal and noise, and simply noise to receive weak signals in digital information transmission systems. The presented work demonstrates that for structural differences application for the task of a radio pulse detecting against the background of noise and interference, it is necessary to employ non-linear conversion. One of the technical solutions consists in a phase detector application. The article shows the possibility of the research results utilization for developing two-channel receiving units with enhanced noise immunity for digital signals transmission. The possibility of substantial noise immunity increase of the receiving unit by extra receiving channel application with phase detector is shown.

This signal receiving technique may be successfully employed in the regions remote from the cities devoid of the developed internet communication structure. The areas of national economy, included in State programs, such as “Far East Hectare” and similar purpose-oriented programs, financed by the local budgets of Russian Federation provinces and regions may be given as an example of the area of low-power digital data transmission systems employing.

State programs such as the Far Eastern hectare and similar targeted programmes financed from local budgets of regions and regions of the Russian Federation.

Keywords: phase detector, noise immunity, radio pulse, narrowband noise

For citation: Ilyin. A.G., Khafaga A.S. Study of the passage of a mixture of a radio pulse and narrowband noise through a phase detector. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. DOI: [10.34759/trd-2021-121-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-16)

Введение

Вопросы обнаружения полезных сигналов на фоне помех решаются во многих областях науки и техники: в физике, радио- и оптической локации и связи, радионавигации, радиоастрономии, автоматическом управлении, гидроакустике, сейсмологии и др. [1-3].

Основной и наиболее трудной задачей при проектировании радиоприемных систем является проблема помехоустойчивости, т.е. решение задачи нахождения оптимальных способов приема сигналов при воздействии шумов помех [4,7,9]. Это объясняется тем, что одновременно с улучшением характеристик приемников увеличивает уровень помех и повышаются требования к качеству воспроизведения сигнала.

Известно, что большая часть современных радиоприемных систем являются узкополосными, поэтому исследованию возможности повышения помехоустойчивости вышеуказанных систем, следует уделять повышенное внимание [14,15]. В работе [1-3] показана возможность повышения помехоустойчивости приемных устройств за счет использования амплитудно-фазового преобразования смеси сигнала и шума на выходе квазиоптимального линейного фильтра и амплитудно-частотного преобразования смеси сигнала и шума на входе квазиоптимального линейного фильтра. Результаты исследований структуры узкополосных шумов и ее изменение при воздействии гармонического сигнала с различной амплитудой рассмотрены в работе [1-3]. Показано, что шумы на выходе узкополосного линейного фильтра по своей структуре соответствуют амплитудно-модулированному сигналу с подавленной несущей. [16-21] А смесь гармонического

сигнала и шума при больших отношениях сигнала к шуму имеет структуру амплитудно-модулированного колебания. Таким образом, шум и смесь сигнала и шума на выходе узкополосного фильтра имеют различия по структуре сигналов. Показана возможность использования структурных различий шума и смеси сигнала и шума для повышения помехоустойчивости приемных устройств [10-13].

Однако преобразование смеси сигнала и шума с использованием преобразователя фазы не является единственно возможным техническим решением.

Целью настоящей работы является исследование прохождения узкополосного шума и смеси узкополосного шума и сигнала через фазовый детектор.

Исследование проводилось методами математического моделирования при помощи программного пакета MATLAB. Математическая модель исследуемой системы для этого случая представлена на рисунке 1. На выходе фильтра, при отсутствии сигнала получаем искомый гауссовский узкополосный случайный процесс. Структура узкополосного шума, как показано в работе [1] соответствует сигналу с подавленной несущей или сигналу биений. Известно, что особенностью сигнала биений является наличие точек, в которых дисперсия частоты имеет бесконечное значение [5]. В этих точках амплитуда огибающей узкополосных шумов равна нулю, значение фазы скачком изменяется на 180 градусов [6,8]. При наличии полезного сигнала на входе приемника, на выходе полосового фильтра, как следует из работы [5], имеем аддитивную смесь полезного и узкополосного шума.

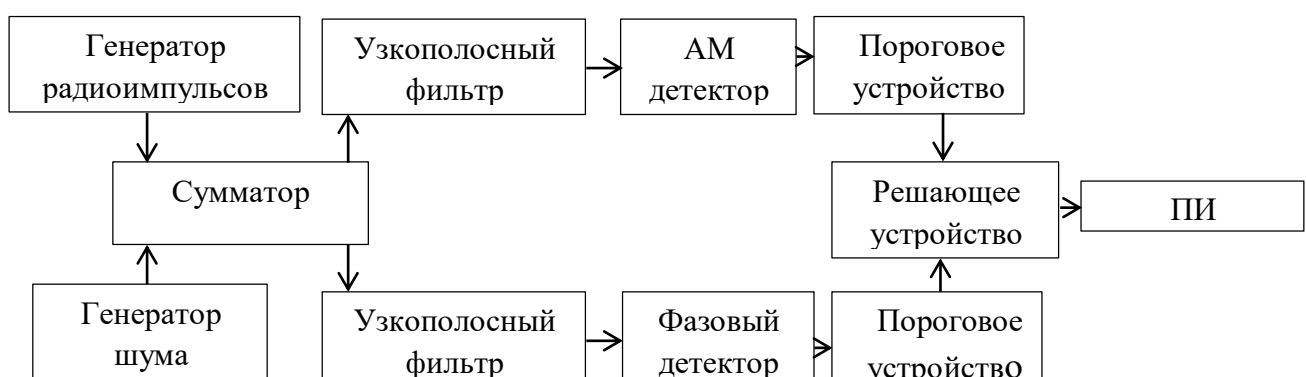


Рис.1 Структурная схема математической модели для исследования прохождения смеси сигнала и шума через каскады приемного устройства

Смесь полезного сигнала и узкополосного шума, как показано в работе [1], при малых отношениях сигнала/шум ($C/Ш < 3$) имеет структуру сигнала с подавленной несущей. При больших отношениях сигнал/шум ($C/Ш > 3$), структура узкополосного процесса на выходе линейного узкополосного фильтра приближается к структуре амплитудно-модулированного сигнала. Различие в структурах выходных узкополосных процессов при наличии и отсутствии полезного сигнала, как показано в работе [1], может быть выявлено при помощи нелинейных методов обработки.

Рассмотрим вопрос прохождения смеси узкополосного шума и полезного сигнала через фазовый детектор. Для этой цели в соответствие со структурной схемой экспериментальной установки, представленной на рисунке 1, была создана математическая модель при помощи пакета программ (Simulink MATLAB) (Рис.2). В качестве полезного сигнала использовался радиоимпульс, который формировался при помощи стандартного генератора из библиотеки пакета программ (Simulink MATLAB). Помеха в виде "белого" шума, также была сформирована специальным генератором из пакета программ. Для получения узкополосного процесса, радиоимпульс и "белый" шум смешивались при помощи сумматора, после чего аддитивная смесь полезного сигнала и широкополосного шума подавалась на квазиоптимальные узкополосные линейные фильтры. На выходе фильтров в силу линейности преобразования, имеем смесь узкополосного шума и полезного сигнала. Установка является двух канальной, т.е. сигнал с выхода сумматора подается на канал

состоящий из линейного фильтра и амплитудного детектора и канал состоящий из аналогичного линейного фильтра и фазового детектора. Это сделано для того, чтобы иметь возможность исследовать помехоустойчивость реального приемника, прохождения смеси сигнала и шума через фазовый детектор, а также исследовать возможности повышения помехоустойчивости реального приемника за счет введения в схему дополнительного канала с нелинейной обработкой.

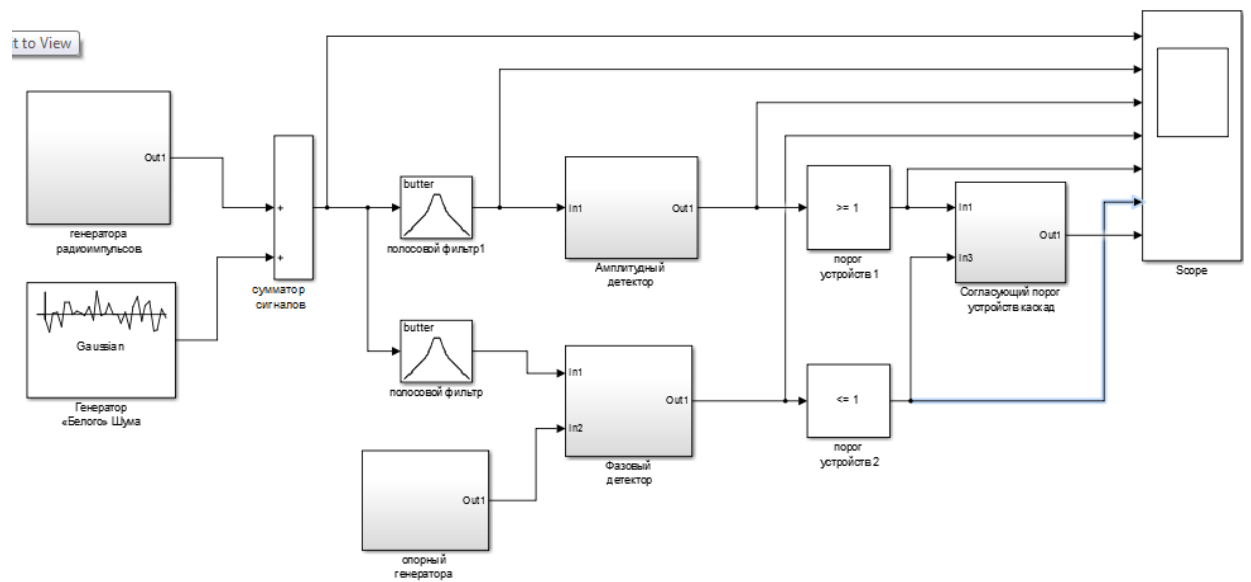


Рис.2. Структурная схема математической модели реализованная с использованием пакета программ (Simulink MATLAB).

Результаты исследования прохождения смеси сигнала и узкополосного шума через каскады приемного устройства и фазовый детектор приведены на рисунке 3.



Рис.3. Результаты экспериментальных исследований

Как видно, из представленных графиков в случае присутствии полезного сигнала на входе приемника девиация фазы процесса на выходе линейного фильтра уменьшается. Это хорошо заметно по падению напряжения на выходе фазового детектора. Таким образом, уменьшение напряжения на выходе фазового детектора может быть использовано в качестве информационного признака, по которому косвенно можно принимать решение о наличии или отсутствии сигнала на входе приемного устройства. Однако следует отметить, что относительно плавное изменение напряжения на выходе фазового детектора не позволяет точно определить начало и конец радиоимпульса. Поэтому использование канала с фазовым детектором

без основного канала приема с амплитудным детектором и пороговым устройством не позволит существенно улучшить характеристики приемных устройств.

По нашему мнению, помехоустойчивость большинства приемных устройств может быть существенно повышена за счет введения в схему дополнительного канала с фазовым детектором. Схема предлагаемого технического решения представлена на рисунке 3.

Как известно, реальный приемник для обнаружения радиоимпульса в смеси сигнала и шума состоит из последовательно включенных блоков; квазиоптимальный линейный фильтр - амплитудный детектор - пороговое устройство. При малых отношениях сигнал/шум вышеуказанное устройство не всегда может обеспечить заданную вероятность ложной тревоги, в том случае, если в качестве критерия оптимальности выбран критерий Неймана-Пирсона.

Для уменьшения вероятности ложной тревоги, в схему включен дополнительный канал с фазовым детектором и пороговым устройством. В том случае, если на выходе фазового детектора имеется напряжение ниже порогового, решающее устройство блокирует прохождение сигнала с выхода порогового устройства основного канала. Тем самым блокируются ложные решения, принятые основным пороговым устройством по фазовому признаку [4].

Заключение

Таким образом, результаты исследования, приведенные в работе, позволяют сделать следующие выводы:

1. Результаты исследования узкополосных приемных систем с дополнительным каналом приема [1] показали возможность их использования в локальных системах

передачи цифровой информации при ограниченной мощности сигнала в точки приема.

2. В качестве нелинейного преобразователя фазы в дополнительном канале приема можно успешно использовать обычный фазовый детектор, который позволяет использовать структурные отличия смеси сигнала и шума и просто шума [1] для более достоверного приема решения о наличии или отсутствия входе приемника.

3. Как показали результаты математического моделирования, применения дополнительного канала с фазовым преобразователем на основе фазового детектора позволяет уменьшить вероятность ложной тревоги в 1.8 раза, по сравнению с одноканальным приемным устройством на основе оптимального линейного фильтра, амплитудного детектора и порогового устройства.

Список источников

1. Ильин А.Г. повышение помехоустойчивости и пропускной способности радиотехнических и оптоэлектронных систем на базе амплитудно-фазового преобразования сигнала и шумов. - Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н.Туполева, 2005. - 192 с.

2. Ильин А.Г., Кириллин А.В. Моделирование узкополосных шумов на выходе линейного фильтра // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2012. № 1. С. 72-77.

3. Ильин А.Г., Ильин Г.И., Баина В.С. К вопросу помехозащищенности реальных приемных устройств // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2013. № 4. С. 143-146.

4. Агеев Ф.И., Вознюк В.В., Худик М.Ю. Повышение помехоустойчивости систем передачи данных фазоманипулированными шумоподобными сигналами в условиях действия помех с различной спектральной структурой на основе целенаправленной модификации спектра сигнала // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=158242>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-08](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-08)
5. Ильин А.Г., Баина В.С., Секхи С.З. Моделирование случайных процессов на выходе линейного амплитудного детектора // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2014. № 2. С. 148-153.
6. Ilyin A.G., Khafaga A.S.M., Yunusova V. Modeling the Narrowband and Wideband Noise at the Output of Nonlinear Converters // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2021. URL: DOI:[10.1109/IEEECONF51389.2021.9416064](https://doi.org/10.1109/IEEECONF51389.2021.9416064)
7. Кузнецов В.С., Волков А.С., Солодков А.В., Сорока В.Г. Моделирование шумоподобной системы связи на основе ансамблей симплексных кодов // Труды МАИ. 2020. № 111. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=115131>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-9](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-9)
8. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Высшая школа, 1983. - 536 с.
9. Вознюк В.В., Куценко Е.В. Помехоустойчивость систем радиосвязи с двоичными фазоманипулированными широкополосными сигналами при воздействии ретранслированных компенсационных помех типа прямой инверсии сигнала // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2018. № 660. С. 44-56.

10. Ильин А.Г., Хафаджа А.С. Моделирование прохождения смеси узкополосных шумов и полезного сигнала через фазовый детектор // Международная научно-практическая конференция «Перспективы и технологии развития в области технических наук»: сборник трудов. (Нижний Новгород, 25 февраля 2017). – Нижний Новгород: Институт инновационных технологий, 2017. С. 24-26.
11. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. - М.: Радио и связь, 1982. - 624 с.
12. Khafaga Ali S. Mahdi. Performance Analysis and Comparison of narrowband noise passing through filter types(Elliptic) and (Butterworth) // Journal of Physics: Conference Series, 2021, vol. 1973, no. 1. DOI:[10.1088/1742-6596/1973/1/012009](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012009)
13. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
14. Волков А.С., Солодков А.В., Сулова К.О., Стрельников А.П. Прототипирование помехоустойчивых кодов в системах связи с кодовым разделением каналов // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=159789>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-11)
15. Казак П.Г., Шевцов В.А. Принципы построения энергоэффективной системы сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа в Интернет для Арктики // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=158239>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-06)
16. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. - М.: Советское радио, 1966. - 680 с.
17. Борисов В.И. Зинчук В.М. Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход. - М.: РадиоСофт, 2008. - 260 с.

18. Звонарев В.В., Попов А.С., Худик М.Ю. Методика расчета вероятности ошибки посимвольного приема дискретных сообщений при наличии помех // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=104213>
19. Голубев В.Н., Зимогляд В.Г. Оценка помехозащищенности главного тракта радиоприемника на основе использования функции распределения вероятностей уровней одиночных помех // Радиотехника. 1986. № 10. С. 2205-2208.
20. Захаров С.И., Корато В.А. Обнаружение гармонического сигнала на фоне стационарной гауссовской помехи с неизвестными параметрами по критерию максимального правдоподобия // Радиотехника и электроника. 1985. Вып. 3. С. 504-512.
21. Еркин Ф.Б., Важенин Н.А., Вейцель В.В. Сравнительный анализ алгоритмов оценки отношения сигнал-шум на основе квадратурных компонент принимаемого сигнала // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62221>

References

1. Il'in A.G. *Povyshenie pomekhoustoichivosti i propusknoi sposobnosti radiotekhnicheskikh i optoelektronnykh sistem na baze amplitudno-fazovogo preobrazovaniya signala i shumov* (Increase of noise immunity and transmission capacity of radio engineering and optoelectronic systems based on amplitude-phase transformation of signal and noise), Kazan', Izd-vo KGTU im. A.N.Tupoleva, 2005, 192 p.
2. Il'in A.G., Kirillin A.V. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*, 2012, no. 1, pp. 72-77.

3. Il'in A.G., Il'in G.I., Baina V.S. K *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*, 2013, no. 4, pp. 143-146.
4. Ageev F.I., Voznyuk V.V., Khudik M.Yu. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158242>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-08](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-08)
5. Il'in A.G., Baina V.S., Sekkhi S.Z. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*, 2014, no. 2, pp. 148-153.
6. Ilyin A.G., Khafaga A.S.M., Yunusova V. Modeling the Narrowband and Wideband Noise at the Output of Nonlinear Converters, *Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 2021. URL: DOI:[10.1109/IEEECONF51389.2021.9416064](https://doi.org/10.1109/IEEECONF51389.2021.9416064)
7. Kuznetsov V.S., Volkov A.S., Solodkov A.V., Soroka V.G. *Trudy MAI*, 2020, no. 111. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115131>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-9](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-9)
8. Baskakov S.I. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* (Radio engineering penalties and signals), Moscow, Vysshaya shkola, 1983, 536 p.
9. Voznyuk V.V., Kutsenko E.V. *Trudy Voенно-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2018, no. 660, pp. 44-56.
10. Il'in A.G., Khafadzha A.S. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Perspektivy i tekhnologii razvitiya v oblasti tekhnicheskikh nauk»: sbornik trudov*. Nizhnii Novgorod, Institut innovatsionnykh tekhnologii, 2017, pp. 24-26.
11. Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika* (Statistical radio engineering), Moscow, Radio i svyaz', 1982, 624 p.

12. Khafaga Ali S. Mahdi. Performance Analysis and Comparison of narrowband noise passing through filter types(Elliptic) and (Butterworth), *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1973, no. 1. DOI:[10.1088/1742-6596/1973/1/012009](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012009)
13. Varakin L.E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* (Communication systems with noise-like signals), Moscow, Radio i svyaz', 1985, 384 p.
14. Volkov A.S., Solodkov A.V., Suslova K.O., Strel'nikov A.P. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159789>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-11)
15. Kazak P.G., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158239>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-06)
16. Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika* (Statistical radio engineering), Moscow, Sovetskoe radio, 1966, 680 p.
17. Borisov V.I. Zinchuk V.M. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi. Veroyatnostno-vremennoi podkhod* (Interference immunity of radio communication systems. Probability-time approach), Moscow, RadioSoft, 2008, 260 p.
18. Zvonarev V.V., Popov A.S., Khudik M.Yu. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104213>
19. Golubev V.N., Zimoglyad V.G. *Radiotekhnika*, 1986, no. 10, pp. 2205-2208.
20. Zakharov S.I., Korado V.A. *Radiotekhnika i elektronika*, 1985, no. 3, pp. 504-512.
21. Erkin F.B., Vazhenin N.A., Veitsel' V.V. *Trudy MAI*, 2015, no. 83. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=62221>

Статья поступила в редакцию 12.11.2021; одобрена после рецензирования 16.11.2021;
принята к публикации 21.12.2021

The article was submitted on 12.11.2021; approved after reviewing on 16.11.2021; accepted
for publication on 21.12.2021