

РАДИОТЕХНИКА, РАДИОЛОКАЦИЯ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

УДК 621.396

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КОГНИТИВНЫХ РАДИОСИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ АДАПТАЦИИ К ДЕЙСТВИЮ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ЧЕТЫРЕХПОЗИЦИОННЫХ РАДИОСИГНАЛОВ

А. А. Лисничук, к.т.н., доцент кафедры РУС РГРТУ; a.a.lisnichuk@gmail.com

С. Н. Кириллов, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой РУС РГРТУ; kirillov.lab@gmail.com

Целью данной работы является анализ характеристик когнитивных радиосистем передачи информации, осуществляющих многокритериальный синтез четырехпозиционных радиосигналов в интересах адаптации к действию узкополосных помех с различными параметрами. Проведен анализ характеристик когнитивных радиосистем передачи информации, в которых осуществляется многокритериальный синтез радиосигналов, учитывающих следующие показатели качества: помехоустойчивость к действию узкополосных помех и аддитивного «белого» гауссовского шума (АБГШ); пик-фактор (энергоэффективность сигналов) и уровень внеполосного излучения. Определены показатели качества когнитивных радиосистем при адаптации к изменению параметров узкополосной помехи. Когнитивные радиосистемы передачи информации при наиболее неблагоприятном (из рассмотренных) воздействии на радиоканал узкополосной помехи (центральная частота равнялась частоте несущего колебания полезного сигнала, ширина спектра составляла 5 %) обеспечивают помехоустойчивость на уровне сигнала с QPSK при воздействии только АБГШ вплоть до отношения сигнал-помеха -7 дБ, что на 27 дБ превосходит данный показатель по сравнению с системами без адаптации, использующими известные виды модуляции.

Ключевые слова: многокритериальный синтез радиосигналов, системы когнитивного радио, многокритериальная оптимизация, повышение помехоустойчивости.

DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-3-8

Введение

В интересах стабилизации характеристик когнитивных радиосистем передачи информации (РСПИ) на требуемом уровне при действии аддитивных узкополосных помех (УП) с изменяющимися во времени параметрами необходимо производить адаптацию данных систем. Причем целесообразна адаптация когнитивных РСПИ с помощью многокритериального синтеза радиосигналов [1, 2]. Многокритериальный подход необходим для адекватного управления важными, часто противоречащими друг другу характеристиками РСПИ и, как следствие, позволяет находить компромисс между ними. Целесообразно исследовать следующие важные показатели качества РСПИ: помехоустойчивость к дей-

ствию УП и АБГШ; уровень внеполосного излучения и пик-фактор (энергоэффективность сигналов).

Для уточнения постановки задачи многокритериального синтеза целесообразно ограничить класс сигналов, рассматриваемых при адаптации РСПИ к действию УП. На практике [3] для передачи данных широко применяют четырехпозиционные радиосигналы, например QPSK-подобные сигналы, позволяющие реализовать сравнительно высокие характеристики РСПИ при малом объеме канального алфавита. Это, в свою очередь, положительно отражается на скорости выполнения многокритериального синтеза радиосигналов.

Представляют интерес исследование показателей качества когнитивных РСПИ при измене-

нии параметров УП и проведение сравнительного анализа с существующими системами, использующими известные сигналы.

Целью данной работы является анализ характеристик когнитивных РСПИ, осуществляющих многокритериальный синтез четырехпозиционных радиосигналов в интересах адаптации к действию узкополосных помех с различными параметрами.

Теоретическая часть

Одним из широко применяемых на практике методов решения многокритериальных задач является переход к синтезу радиосигналов на основе взвешенной суммы критериев качества [4-8]. Такой подход позволяет задавать компромисс между характеристиками РСПИ путем определения соответствующих весовых коэффициентов.

Процедура синтеза четырехпозиционных радиосигналов была приведена в [5], в качестве начальных условий выбирался канальный алфавит сигнала с QPSK. Оптимизация выполнялась квазиньютоновским методом по критерию минимума следующей целевой функции:

$$k_p(\mathbf{S}) = c_1 M_1 \int |G_0(f) - G_S(f)|^2 df + c_2 M_2 / \rho_S + c_3 M_3 \eta(G_S(f), G_M(f)) + c_4 M_4 D_S / \mu_S^2, \quad c_i, M_i > 0, \quad \sum_{i=1}^4 c_i = 1, \quad (1)$$

где $c_i M_i$ – соответственно весовые и масштабирующие (приводящие в одинаковый динамический диапазон) коэффициенты для каждого входящего критерия качества; $G_0(f)$, $G_S(f)$ – соответственно «эталонная» (с провалом на частоте действия УП) и текущая нормированная спектральная плотность мощности (СПМ) радиосигналов; ρ_S – среднее значение всех возможных попарных евклидовых расстояний между элементами $s_k, s_l \in \mathbf{S}$ ($k, l = \overline{1;4}, k \neq l$) канального алфавита \mathbf{S} ; $\eta(\bullet)$ – функция «штрафа», ограничивающая превышение внеполосным излучением сигнала специальной функции $G_M(f)$; D_S, μ_S – соответственно дисперсия и математическое ожидание мгновенной мощности сигнала, задаваемого канальным алфавитом \mathbf{S} .

Экспериментальные исследования

Анализ показателей качества синтезированных радиосигналов в зависимости от параметров действующей узкополосной помехи. Для исследования работоспособности когнитивных РСПИ при изменении внешних параметров УП

целесообразно произвести количественную оценку показателей качества синтезированных радиосигналов при вариации таких параметров действующей УП, как нормированная центральная частота (f_N), ширина спектра (Δf_N) и отношение сигнал-помеха (q). Кроме того, целесообразно осуществить сравнительный анализ синтезированных и известных четырехпозиционных радиосигналов. На рисунках 1 и 2 приведены зависимости показателей качества синтезированных и известных радиосигналов от нормированной центральной частоты действующей аддитивной УП.

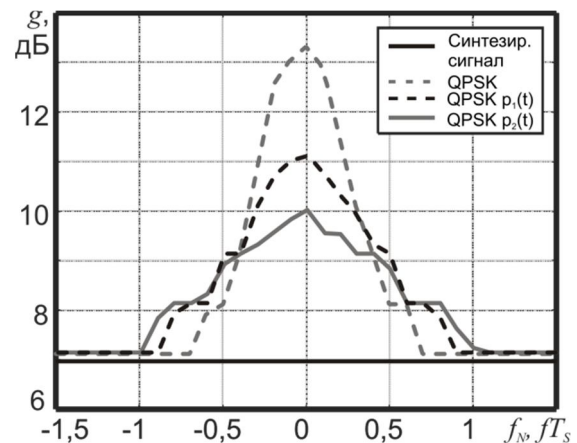


Рисунок 1 – Зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных радиосигналов от центральной частоты УП

Здесь g – порог помехоустойчивости сигналов, который определялся как значение, равное отношению E_b / N_0 при вероятности битовой ошибки $P_o = 10^{-3}$, в условиях действия АБГШ и УП.

При имитационном моделировании использовались следующие значения весовых коэффициентов – $c_1 = 0,5$ и $c_3 = 0,3$ [5]; на вход детектора поступала смесь полезного сигнала, АБГШ и УП с шириной спектра 3% от ширины СПМ сигнала с QPSK($p_1(t)$), у которого форма элементарного импульса $p_1(t) = \sin(\pi t / T_S)$, $0 \leq t \leq T_S$, (T_S – символьный интервал); отношение сигнал-помеха равнялось 12 дБ; для получения устойчивых оценок для каждого значения величины порога помехоустойчивости (g) накапливалась статистика, соответствующая не менее 100 битовым ошибкам; кроме того, для всех параметров статистика накапливалась по 100 реализациям.

Из анализа рисунка 1 следует, что ухудшение помехоустойчивости для известных видов

радиосигналов наблюдается при совмещении частоты действующей УП с частотами наибольшей концентрации СПМ сигнала и, следовательно, наиболее негативное воздействие оказывает УП с центральной частотой, равной несущей (без учета влияния на системы синхронизации). При этом синтезированный радиосигнал во всем диапазоне $[-1,5; 1,5] fT_s$ сохраняет помехоустойчивость на уровне сигнала с QPSK при воздействии только АБГШ, максимальный выигрыш в помехоустойчивости достигает 6,1; 4,0; 2,9 дБ по сравнению с QPSK, QPSK ($p_1(t)$) и QPSK ($p_2(t) = \sin^2(\pi t / T_s)$) сигналами соответственно.

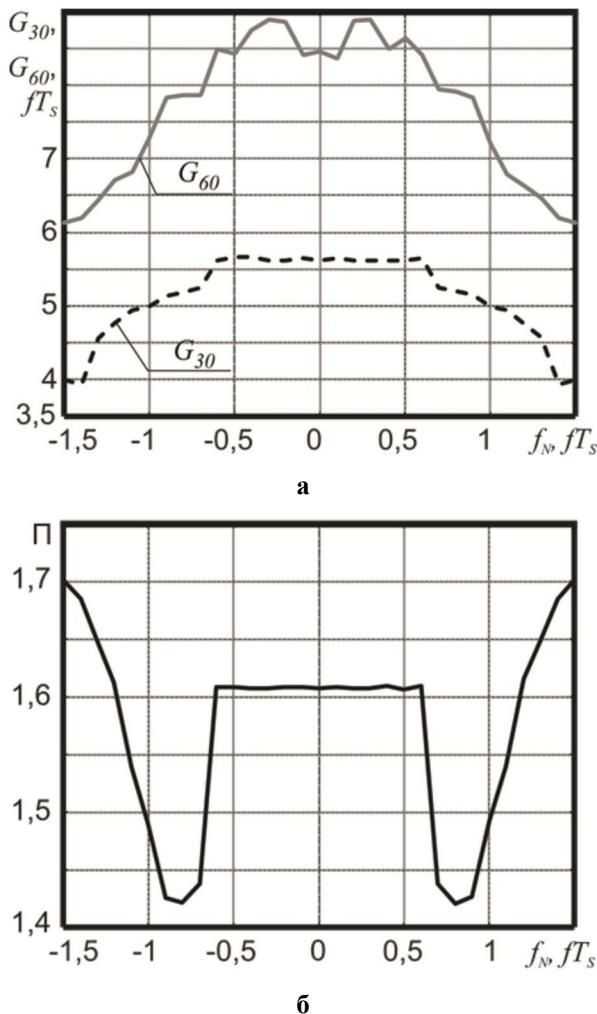


Рисунок 2 – Зависимости спектральной (а) и энергетической (б) эффективности синтезированного радиосигнала от центральной частоты УП

Здесь G_{30} и G_{60} – соответственно значения ширины СПМ радиосигнала по уровням -30 и -60 дБ; Π – пик-фактор.

Из анализа рисунка 2 следует, что при смещении центральной частоты действующей УП к краю исследуемого диапазона спектральная эффективность постепенно улучшается, что связа-

но с перемещением провала в СПМ сигнала и, следовательно, с переходом одной из двух частей главного лепестка СПМ в «боковой» лепесток, который тем меньше, чем ближе УП к краю диапазона. При этом ухудшение значения пик-фактора достигает 6 %, так как в данных условиях преобладает критерий минимума внеполосного излучения. Однако при изменении центральной частоты УП в диапазоне, наиболее эффективном для постановки преднамеренной помехи, т.е. $[-0,6; 0,6] fT_s$, наблюдается сравнительно низкая вариация показателей качества синтезируемого радиосигнала.

При дальнейшем исследовании показателей качества когнитивной РСПИ целесообразно рассматривать УП с нулевой нормированной центральной частотой, т.е. действующей на несущей частоте полезного радиосигнала. Такая помеха среди рассмотренных оказывает наиболее негативное воздействие на радиолинию.

На рисунке 3 приведены зависимости помехоустойчивости синтезированных и известных радиосигналов от ширины спектра УП (Δf_N), нормированной к ширине спектра сигнала с QPSK ($p_1(t)$).

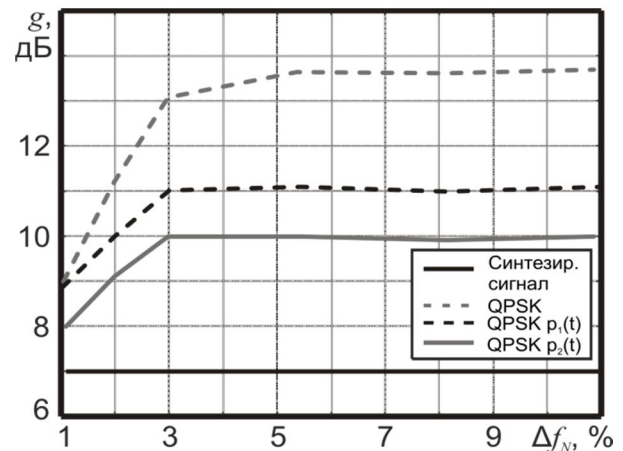


Рисунок 3 – Зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных радиосигналов от ширины спектра УП

Здесь значения весовых коэффициентов – $c_1 = 0,5$ и $c_3 = 0,3$; $f_N = 0 fT_s$; отношение сигнал-помеха равнялось 12 дБ.

Из анализа рисунка 3 следует, что при фиксированном отношении сигнал-помеха для рассмотренных видов модуляции порог помехоустойчивости (g), при котором вероятность битовой ошибки $P_o = 10^{-3}$, слабо изменяется при вариации Δf_N в пределах 3-11 %.

При этом синтезированный радиосигнал сохраняет помехоустойчивость на уровне сигнала с

QPSK при воздействии только АБГШ; максимальный выигрыш в помехоустойчивости достигает 6,6; 4,1; 3,0 дБ по сравнению с QPSK, QPSK ($p_1(t)$) и QPSK ($p_2(t)$) сигналами соответственно (при $\Delta f_N = 5\%$). Спектральная и энергетическая эффективности синтезированного радиосигнала слабо зависят от изменения Δf_N в рассмотренных пределах.

На рисунке 4 приведены зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных радиосигналов от отношения сигнал-помеха (q).

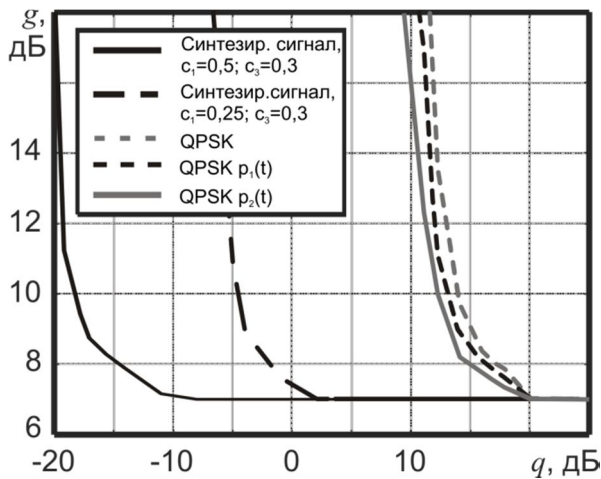


Рисунок 4 – Зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных радиосигналов от отношения сигнал-помеха

Здесь нормированная центральная частота УП $f_N = 0 f_{T_S}$, т.е. соответствует несущей частоте полезного сигнала; ширина СПМ УП $\Delta f_N = 5\%$.

Из анализа рисунка 4 следует, что синтезированные радиосигналы при значениях весовых коэффициентов $c_1 = 0,5$; $c_3 = 0,3$ и $c_1 = 0,25$; $c_3 = 0,3$ вплоть до $q = -7$ и 2 дБ соответственно сохраняют помехоустойчивость на уровне сигнала с QPSK при воздействии только АБГШ; при этом для рассмотренных известных видов модуляции такое же значение показателя g достигается при отношении сигнал-помеха больше 20 дБ. Характеристики синтезированного сигнала при значениях $c_1 = 0,25$; $c_3 = 0,3$ приведены для иллюстрации показателя помехоустойчивости при уменьшении весового коэффициента c_1 для критерия минимума воздействия УП.

При этом спектральная и энергетическая эффективности (см. таблицу) синтезированных радиосигналов слабо зависят от отношения сигнал-помеха.

Показатели качества радиосигналов

Вид модуляции	QPSK-сигнал		Синтезированные сигналы	
	$p_1(t)$	$p_2(t)$	($c_1 = 0,25$; $c_3 = 0,3$)	($c_1 = 0,5$; $c_3 = 0,3$)
Ширина СПМ на уровне -30 дБ, f_{T_S}	4,6	3,8	5,1	5,6
Ширина СПМ на уровне -60 дБ, f_{T_S}	32,0	13,4	11,1	9,9
Пик-фактор	1,4	1,6	1,4	1,6

Анализ результатов, приведенных в таблице, показывает, что радиосигналы с синтезированным канальным алфавитом при $c_1 = 0,25$; $c_3 = 0,3$ и $c_1 = 0,5$; $c_3 = 0,3$, хотя и имеют большую ширину спектра на уровне -30 дБ (за счет формирования провала в СПМ), значительно выигрывают на уровне -60 дБ (в сравнении со спектрально-эффективными сигналами: с QPSK ($p_2(t)$) – более чем в 1,2 и 1,3 раза; а с QPSK ($p_1(t)$) – в 2,9 и 3,2 раз соответственно). При этом значение пик-фактора сравнимо для известных сигналов с QPSK ($p_2(t)$) и синтезированных при $c_1 = 0,5$; $c_3 = 0,3$; а также с QPSK ($p_1(t)$) и при $c_1 = 0,25$; $c_3 = 0,3$.

Таким образом, когнитивные РСПИ при наиболее неблагоприятном (из рассмотренных) воздействии на радиоканал УП ($f_N = 0 f_{T_S}$; $\Delta f_N = 5\%$) обеспечивают помехоустойчивость на уровне сигнала с QPSK при воздействии только АБГШ вплоть до отношения сигнал-помеха $q = -7$ дБ, что на 27 дБ лучше данного показателя для известных видов модуляции [QPSK, QPSK ($p_1(t)$) и QPSK ($p_2(t)$)].

Заключение

Проанализированы результаты воздействия УП с различными параметрами на когнитивные радиосистемы передачи информации, в которых производится адаптация за счет многокритериального синтеза четырехпозиционных радиосигналов.

В процессе многокритериального синтеза сигналов учитывались следующие показатели качества радиосистем передачи информации: помехоустойчивость к действию узкополосных

помех и аддитивного «белого» гауссовского шума; уровень внеполосного излучения; пик-фактор (энергоэффективность сигналов).

Когнитивные радиосистемы передачи информации при наиболее неблагоприятном (из рассмотренных) воздействии на радиоканал узкополосной помехи (центральная частота равнялась частоте несущего колебания полезного сигнала, ширина спектра $\Delta f_N = 5\%$) обеспечивают помехоустойчивость на уровне сигнала с QPSK при воздействии только АБГШ вплоть до отношения сигнал-помеха $q = -7$ дБ, что на 27 дБ лучше данного показателя для известных видов модуляции.

При этом радиосигналы с синтезированным канальным алфавитом при весовых коэффициентах $c_1 = 0,25$; $c_3 = 0,3$ и $c_1 = 0,5$; $c_3 = 0,3$, хотя и имеют большую ширину спектра на уровне -30 дБ (за счет формирования провала в СПМ), значительно выигрывают на уровне -60 дБ (в сравнении со спектрально-эффективными сигналами: с QPSK($p_2(t)$) – более чем в 1,2 и 1,3 раза; а с QPSK($p_1(t)$) – в 2,9 и 3,2 раз соответственно).

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-3658.2018.9, соглашение от 16 ноября 2018 г. № 075-02-2018-681.

Библиографический список

1. Кириллов С. Н., Лисничук А. А. Многокритериальный синтез сигнально-кодовых конструкций на основе зависимых сигналов для адаптации радио-

систем передачи информации к действию узкополосных помех // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 4. С. 3-12.

2. Кириллов С. Н., Покровский П. С., Лисничук А. А. Многокритериальный синтез четырехпозиционных радиосигналов на основе ансамбля кодовых последовательностей в интересах адаптации радиосистем передачи информации к структурным помехам // Радиотехника. 2016. № 8. С. 117-124.

3. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. М.: Радио и связь, 2000. 520 с.

4. Гуткин Л. С. Оптимизация радиоэлектронных устройств // М.: Сов. Радио, 1975. 368 с.

5. Кириллов С. Н., Покровский П. С., Лисничук А. А. Многокритериальный синтез четырехпозиционных радиосигналов на основе канального алфавита. Радиотехника. 2015. № 11. С. 14-21.

6. Покровский П. С., Лисничук А. А. Алгоритм синтеза радиосигналов для адаптации интеллектуальных систем передачи информации к действию помех. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 48. С. 20-26.

7. Кириллов С. Н., Покровский П. С., Лисничук А. А. Процедура многокритериального синтеза сигнально-кодовых конструкций для адаптации систем передачи информации к действию узкополосных помех. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 55. С. 3-9.

8. Кириллов С. Н., Покровский П. С., Лисничук А. А. Процедура синтеза 4-позиционных сигналов с расширением спектра. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 50-1. С. 29-33.

UDC 621.396

ANALYSIS OF COGNITIVE RADIO SYSTEMS CHARACTERISTICS ADAPTING TO NARROW-BAND INTERFERENCE EFFECT BASED ON SYNTHESIZED FOUR-POSITION RADIO SIGNALS

A. A. Lisnichuk, Ph.D. (Tech.), associate professor, RSREU, Ryazan; a.a.lisnichuk@gmail.com

S. N. Kirillov, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan; kirillov.lab@gmail.com

The aim is to analyze the characteristics of cognitive radio systems that perform multi-criteria synthesis of four-position radio signals for adapting to the action of narrow-band interference with different parameters. The analysis of cognitive radio systems characteristics adapting to narrow-band interference effect was carried out. In these systems, multi-criteria synthesis of radio signals is realized, taking into account the following quality indicators: noise immunity to the action of narrow-band interference and additive «white» Gaussian noise (AWGN); peak-factor (energy efficiency of signals) and the level of out-of-band radiation. The quality indices of cognitive radio systems adapting to narrow-band interference change are determined. Cognitive radio systems adapting to the most unfavorable (of the considered) narrow-band interference effect (central frequency was equal to carrier wave frequency of useful signal; spectrum width was 5 %) provide noise immunity at the same level as QPSK signal under the influence of only AWGN up to relation signal-interference -7 dB. The radio systems without adaptation using known modulation types are inferior at this quality indicator up to 27 dB.

Key words: *multi-criteria synthesis of radio signal, cognitive radio system, multi-criteria optimization, noise immunity increase.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-3-8

References

1. **Kirillov S. N., Lisnichuk A. A.** «The multi-criteria synthesis of signal-code sequence based on dependent signals to adapt data communication radio system to narrow-band interference», *Vestnik RGRU*. 2017, no. 4, pp. 3-12. (in Russian).
2. **Kirillov S. N., Pokrovskij P. S., Lisnichuk A. A.** «The multi-criteria synthesis of four-position radio signal by code sequence ensemble for adapt data communication radio system to structural interference», *Radiotekhnika – Radioengineering*. 2016, no. 8, pp. 117-124. (in Russian).
3. **Feher K.** *Besprovodnaja cifrovaja svjaz'. Metody moduljacji i rasshirenija spektra.* [Wireless digital communications: Modulation and spread spectrum application]. Moscow: Radio i svjaz'. 2000, 520 p. (In Russian).
4. **Gutkin L. S.** *Optimizacija radioelektronnyh ustrojstv* [Optimization of radio-electronic devices]. M.: Sov. radio. 1975, 368 p. (in Russian).
5. **Kirillov S. N., Pokrovskij P. S., Lisnichuk A. A.** «The multi-criteria synthesis of four-position radio signal by signal set design». *Radiotekhnika – Radioengineering*. 2015, no. 11, pp. 14-21. (in Russian).
6. **Pokrovskij P. S., Lisnichuk A. A.** «Radio signal synthesis algorithm to adapt data communication intelligence system to interference effect». *Vestnik RGRU*. 2014, no. 48, pp. 20-26. (in Russian).
7. **Kirillov S. N., Pokrovskij P. S., Lisnichuk A. A.** «The procedure for multi-criteria synthesis of signal-code sequence to adapt data communication radio system to narrow-band interference». *Vestnik RGRU*, 2016. no. 55, pp. 3-9. (in Russian).
8. **Kirillov S. N., Pokrovskij P. S., Lisnichuk A. A.** «Procedure of synthesis for four-position radio signal with spread spectrum». *Vestnik RGRU*. 2014, no. 50-1, pp. 29-33. (in Russian).