

Научная статья  
УДК 621.396.96  
doi: 10.34822/1999-7604-2022-2-39-45

## ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ СИГНАЛОВ С КВАНТОВАНИЕМ ФАЗЫ

Анатолий Иванович Дёмко<sup>1</sup>, Олег Юрьевич Семенов<sup>2</sup>✉

<sup>1, 2</sup>Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

<sup>1</sup>dai321@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0747-0294>

<sup>2</sup>eous.tutor.phinma@mail.ru✉, <http://orcid.org/0000-0002-3553-7356>

**Аннотация.** В радиолокации и связи широко используются многофазные сигналы, в частности с квадратичным законом изменения фазы, что определяет актуальность их изучения и оптимизации. Целью исследования является рассмотрение аппаратного высокостабильного способа формирования многофазных сигналов с дискретизацией фазы. В статье рассмотрены фазовращатели на основе элементов цифровой техники. Представленные результаты могут быть использованы в радиолокации и связи.

**Ключевые слова:** фазовращатель, триггер, сигнальное созвездие, схема совпадения

**Для цитирования:** Дёмко А. И., Семенов О. Ю. Формирование многофазных сигналов с квантованием фазы // Вестник кибернетики. 2022. № 2 (46). С. 39–45. DOI 10.34822/1999-7604-2022-2-39-45.

Original article

## GENERATING MULTIPHASE SIGNALS WITH PHASE QUANTIZATION

Anatoly I. Dyomko<sup>1</sup>✉, Oleg Yu. Semenov<sup>2</sup>✉

<sup>1, 2</sup>Surgut State University, Surgut, Russia

<sup>1</sup>dai321@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0747-0294>

<sup>2</sup>ous.tutor.phinma@mail.ru✉, <http://orcid.org/0000-0002-3553-7356>

**Abstract.** The relevance of studying and optimizing the multiphase signals is determined by their wide use in radiolocation and communications, with quadratic-phase signals being the most common ones. The aim of the article is to study a hardware highly stable method for generating multiphase signals with phase sampling. The article discusses phase shifters based on the elements of digital technology. The results of the study can be used in radiolocation and communications.

**Keywords:** phase shifter, trigger, constellation diagram, coincidence circuit

**For citation:** Dyomko A. I., Semenov O. Yu. Generating Multiphase Signals with Phase Quantization // Proceedings in Cybernetics. 2022. No. 2 (46). P. 39–45. DOI 10.34822/1999-7604-2022-2-39-45.

### ВВЕДЕНИЕ

В современных радиотехнических системах широкое применение находят модулированные сигналы с аналоговыми (непрерывными) и дискретными законами изменения параметров несущего гармонического колебания. Среди различных видов модулированных сигналов особое место занимают фазомодулированные (далее – ФМ) колебания, теория которых достаточно хорошо раз-

работана для применения в радиолокации и электрической связи. Известные методы формирования ФМ-колебаний не всегда обеспечивают высокую точность и стабильность задания фазового сдвига. Целью статьи является рассмотрение аппаратного способа формирования высокостабильных многофазных сигналов с дискретизацией фазы. В радиолокации широко используются непрерывные и импульсные сложные сигналы,

значительное место среди которых занимают сигналы с линейной частотной модуляцией (далее – ЛЧМ), имеющие квадратичный закон изменения фазы [1–3]. Свойства таких сигналов описываются двумерной частотно-временной функцией – функцией неопределенности (далее – ФН).

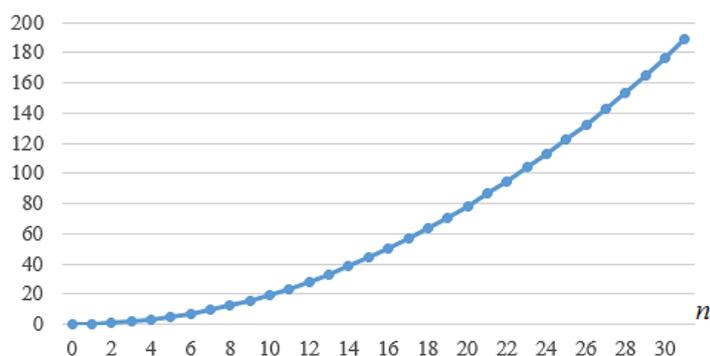
### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сложность обеспечения высокой линейности изменения частоты, а также паразитная амплитудная модуляция (далее – ПАМ), сопровождающая в большинстве случаев ЛЧМ-сигналы, способствовала созданию различных вариантов фазомодулированных аналогов с квадратичным законом изменения фазы (например, радиоимпульсная последовательность с модуляцией фазы в соответствии с кодами Фрэнка) [4–8]. Такой сигнал имеет постоянную несущую частоту и амплитуду и состоит из  $N^2$  элементарных радиоимпульсов длительностью  $\tau_0$  и начальной фазой  $\varphi_n = 2\pi k_n / N$ , где коэффициенты  $k_n$  имеют квадратичную зависимость от порядкового номера импульса  $n$ .

Коэффициенты  $k_n$ , характеризующие закон изменения начальной фазы сигнала, удобно представить в виде квадратной матрицы  $N \times N$ :

$$[k] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & \dots & (N-2) & (N-1) \\ 0 & 2 & 4 & \dots & 2(N-2) & 2(N-1) \\ 0 & 3 & 6 & \dots & 3(N-2) & 3(N-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & N-2 & (N-2)2 & \dots & (N-2)(N-2) & (N-2)(N-1) \\ 0 & N-1 & (N-1)2 & \dots & (N-1)(N-2) & (N-1)(N-1) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

фаза, рад



**Рис. 1. Квадратичный закон изменения фазы многофазной последовательности**  
 Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Кодовая последовательность образуется считыванием строки за строкой взятых по модулю  $N$  элементов матрицы.

Переход от непрерывного квадратичного закона изменения фазы для ЛЧМ к непрерывно-дискретному (за счет того, что задается начальная фаза радиоимпульсов) изменяет структуру и параметры ФН, однако основные ее свойства (поворот главного лепестка относительно оси время/частота, малый уровень боковых лепестков) получают похожими на ЛЧМ.

В электрической связи ФМ-сигналы, и в частности многофазные сигналы с квадратичным законом изменения фазы, могут использоваться для организации многоканальных систем, поскольку имеют хорошие корреляционные свойства, обеспечивающие эффективное уплотнение каналов [9–10].

С учетом сложностей формирования многофазных радиоимпульсных последовательностей был разработан аналог многофазных сигналов с квадратичной зависимостью фазы от порядкового номера радиоимпульсов (рис. 1) в виде радиоимпульсной последовательности с изменением периода следования радиоимпульсов по линейному закону, что обеспечивает требуемый закон изменения текущей фазы [11–14]. При этом фазы отдельных радиоимпульсов одинаковые (например, нулевые), что обеспечивает простую реализацию подобного сигнала.

Другим аналогом многофазных сигналов с квадратичным законом изменения фазы является радиоимпульсная последовательность с модифицированным (рис. 2) законом изменения периода следования радиоимпульсов таким образом, чтобы максимальный сдвиг радиоимпульсов относительно периодически следующих тактовых моментов времени не превышал периода несущего колебания (что соответствует фазовому сдвигу 360 градусов). При этом из квадратичного закона изменения фазы вычитаются значения,

кратные целому числу  $2\pi$  (с учетом периодичности гармонической функции).

Общим в рассмотренных вариантах является то, что формирование фазового сдвига эквивалентного ему изменения периода повторения или временного положения радиоимпульсов производится аналоговыми методами, что обуславливает повышенные требования к стабильности параметров формирователей и может вносить дополнительные погрешности [15–18].

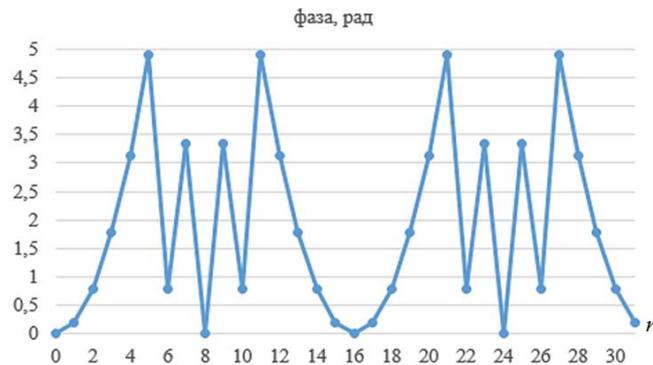


Рис. 2. Модифицированный квадратичный закон изменения фазы многофазной последовательности  
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Используя возможности цифровой схемотехники и взаимосвязь временных параметров периодической последовательности импульсов с фазовыми параметрами первой гармоники этой последовательности, можно предложить варианты формирования квантованных значений из наборов фаз  $\varphi_n = 2\pi n / N$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ ;  $N = 2^m$ .

При большом числе возможных дискретных значений можно произвести аппроксимацию любого закона изменения фазы (в том числе и квадратичного) подобной квантованной (по значениям фазы) многофазной

последовательностью. Основная идея рассматриваемого метода состоит в контролируемом преобразовании временного масштаба при делении частоты триггерами.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Самый простой вариант модулятора временного положения, пересчитываемого в фазу первой гармоники ( $\varphi = 2\pi\tau / T$ ) выходных импульсов, соответствует набору из двух значений ( $0^\circ/180^\circ$ ) фазы (манипуляция фазы). Он представлен на рис. 3.

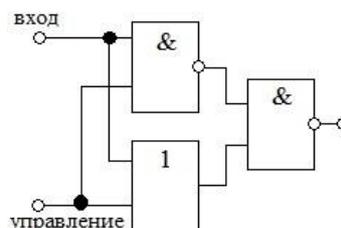
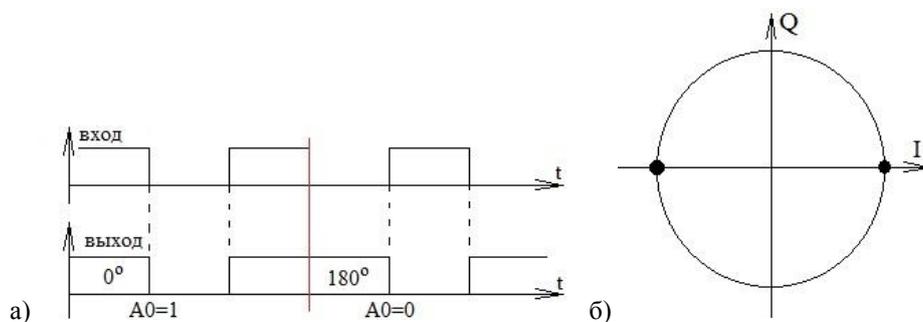


Рис. 3. Универсальный управляемый инвертор

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Вход управления позволяет изменять полярность импульсов (рис. 4), что эквивалентно повороту на  $180^\circ$  фазы выделяемой из этих импульсов первой гармоники. С учетом указанной связи между временным сдвигом и фазой в соответствие набору вре-

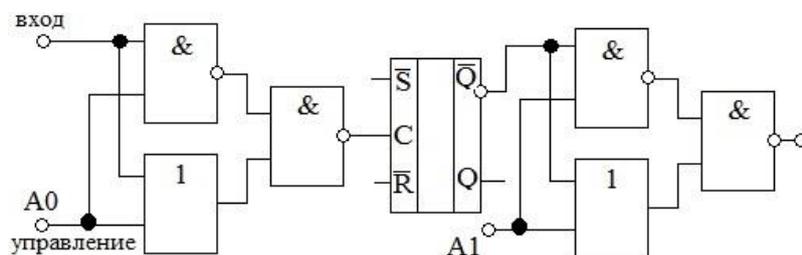
менных сдвигов может быть поставлено сигнальное созвездие сигнала с дискретной фазовой модуляцией (далее – ДФМ), (от англ. – phase shift keying – PSK). Точки на сигнальном созвездии 2-PSK жестко привязаны к значениям фазы  $0^\circ$  и  $180^\circ$ .



**Рис. 4. Временные диаграммы универсального управляемого инвертора (а); сигнальное созвездие 2-PSK (б)**  
 Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Для четырехпозиционной ( $0^\circ/90^\circ/180^\circ/270^\circ$ ) фазовой модуляции в схему на рис. 3 добав-

ляется счетный триггер и еще один управляемый инвертор (рис. 5).

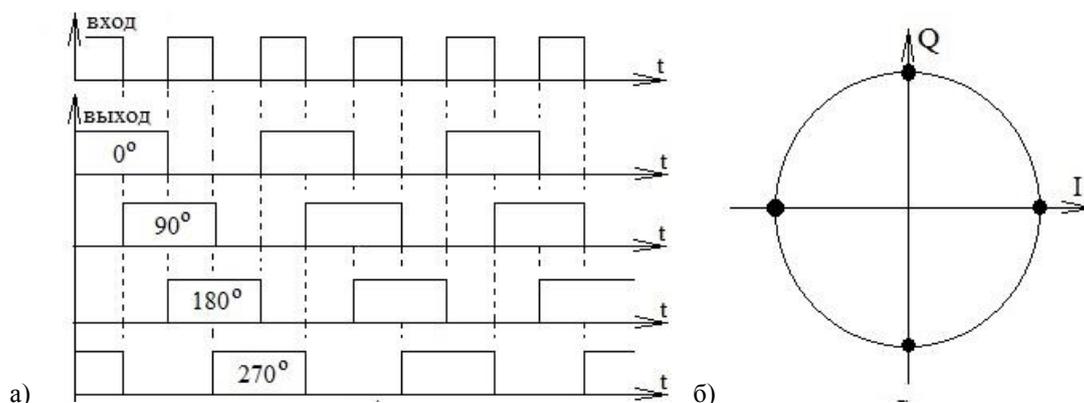


**Рис. 5. Четырехпозиционный модулятор временного сдвига**

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 6 представлены временные диаграммы четырехпозиционного модулятора

временного сдвига и сигнальное созвездие 4-PSK.

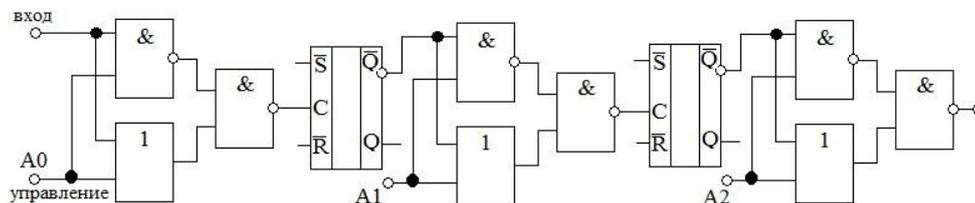


**Рис. 6. Временные диаграммы четырехпозиционного модулятора временного сдвига (а); сигнальное созвездие 4-PSK (б)**

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

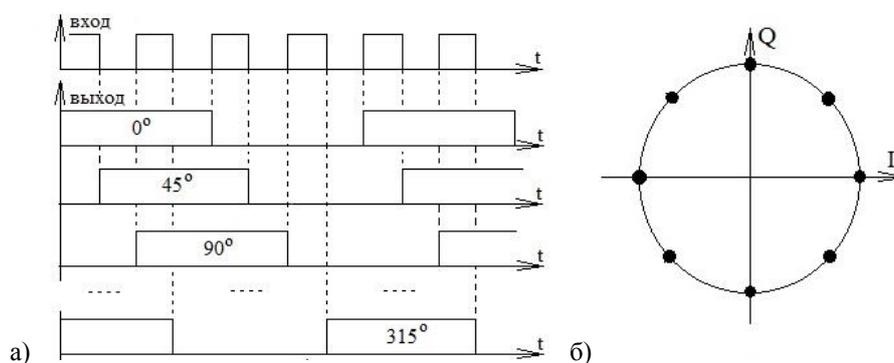
На рис. 7 представлена схема восьмипозиционного ( $0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ/180^\circ/225^\circ/270^\circ/315^\circ$ ) модулятора временного сдвига: в схему на рис. 5 добавляется счетный триггер и еще

один управляемый инвертор, а на рис. 8 – временные диаграммы и сигнальное созвездие 8-PSK.



**Рис. 7. Восьмипозиционный модулятор временного сдвига**

*Примечание:* составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.



**Рис. 8. Временные диаграммы восьмипозиционного модулятора временного сдвига (а); сигнальное созвездие 8-PSK (б)**

*Примечание:* составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Отсюда видна логика построения схем многопозиционных модуляторов фазы: добавление дополнительного триггера и управляемого инвертора удваивает число дискретных значений временного сдвига (и фазы):

$$M = 2^{N+1}, \quad (2)$$

где  $M$  – число значений фазы;

$N$  – число триггеров.

Переход от периодической последовательности прямоугольных импульсов типа меандр к ФМ-радиосигналу может быть произведен функциональным нелинейным преобразованием, линейной фильтрацией (выделение первой гармоники фильтром) или накопительным способом с помощью ФАПЧ. Реализация требуемой несущей частоты может быть реализована простым преобразованием частоты в нужную часть радиочастотного спектра.

По сравнению с известными способами формирования ФМ-сигналов (использование

управляемого фазового модулятора или квадратурной схемы формирования) рассмотренный способ формирования дискретных наборов фазы из ансамбля

$$\varphi_n = \frac{2\pi}{2^{N+1}} n, \quad n = 0, 1, \dots, (2^{N+1} - 1) \quad (3)$$

не является аналоговым, поэтому точность формирования фазы не зависит от различных дестабилизирующих факторов.

Неидеальность работы цифровых фазовых модуляторов может быть оценена с учетом времени задержки сигналов цифровыми элементами. Например, для схем транзисторно-транзисторной логики с диодами Шоттки серии К531 время задержки распространения при включении для логических элементов для этой серии не превышает 5 нс, время задержки распространения при переключении для триггеров (типа ТМ2) не превышает 12 нс. Задержке 12 нс соответствует погреш-

ность задания фазы 1 % (по фазе  $3,5^\circ$ ), что реализуется при частоте повторения импульсов 1,2 МГц (период повторения 833 нс).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный в статье способ формирования фазомодулированных сигналов с дискретным набором значений фазы из заданного

ансамбля обладает высокой точностью задания, сохраняемой при перестройке частоты несущего колебания. Схемы могут быть реализованы на цифровых микросхемах или микроконтроллерах. Представленные в статье результаты могут быть использованы в системах радиолокации и электрической связи.

### Список источников

1. Гуляев Ю. В., Бугаев А. С., Быстров Р. П., Никитов С. А., Черепенин В. А. Микро- и нанoeлектроника в системах радиолокации : монография. М. : Радиотехника, 2014. 479 с.
2. Ботов М. И., Вяхирев В. А., Девотчак В. В. Введение в теорию радиолокационных систем : моногр. / ред. М. И. Ботов. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. 394 с.
3. Niu Z., Zheng J., Su T., Li W., Zhang L. Radar High-Speed Target Detection Based on Improved Minimalized Windowed RFT // IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens. 2021. Vol. 14. P. 870–886.
4. Климов И. З., Копысов А. Н., Чувашов А. М. Уплотнение широкополосного канала связи для передачи телеметрической информации // Вопр. электромеханики. 2010. Т. 119. С. 57–61.
5. Dyomko A. I., Semenov O. Yu., Churilova I. N. Quasi-Optimal Processing Simulation of Ultrasonic Signals // J Phys: Conf Ser. 2020. Vol. 1488. P. 012004. DOI 10.1088/1742-6596/1488/1/012004.
6. Perez-Alcazar P. R., Santos A. Behavior of Quantization Noise for Sinusoidal Signals. A Revision // Journal of Applied Research and Technology. 2009. Vol. 7, No. 2. P. 136–152.
7. Бохов О. С., Косьмин Д. М., Котельников И. В., Козырев А. Б., Осадчий В. Н. Низкопотребляющие малогабаритные радиотехнические модули на основе микроэлектромеханических ключей // Биотехносфера. 2011. № 1–2 (13–14). С. 99–103.
8. Ross T. N., Hetta K., Cormier G, Wight J. S. Design of X-band GaN Phase Shifters // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2015. Vol. 63, Is. 1. P. 244–255.
9. Sheikh I. A., Pannu N. K. Review of Polyphase Filtering Technique in Signal Processing // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. 2018. Vol. 7, Is. 12. P. 213–221.
10. Жукова И. Н. Синтез квазинепрерывных сигналов методом композиции ансамбля многофазных сигналов // Вестн. Новг. гос. ун-та. Сер. Техн. науки. 2014. № 81. С. 17–20.
11. Дёмко А. И., Семенов О. Ю. Методы построения OFDM-систем и обработки радиосигнала в программе Matlab Simulink // Современ. наука: актуал. проблемы теории и практики. Сер. Естествен. и техн. науки. 2019. № 11–2. С. 47–54.

### References

1. Gulyaev Yu. V., Bugaev A. S., Bystrov R. P., Nikitov S. A., Cherepenin V. A. Mikro- i nanoelektronika v sistemakh radiolokatsii : Monograph. Moscow : Radiotekhnika, 2014. 479 p. (In Russian).
2. Botov M. I., Vyakhirev V. A., Devotchak V. V. Vvedenie v teoriyu radiolokatsionnykh sistem : Monograph / Ed. M. I. Botov. Krasnoyarsk : Siberian Federal University, 2012. 394 p. (In Russian).
3. Niu Z., Zheng J., Su T., Li W., Zhang L. Radar High-Speed Target Detection Based on Improved Minimalized Windowed RFT // IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens. 2021. Vol. 14. P. 870–886.
4. Klimov I. Z., Kopysov A. N., Chuvashov A. M. Uplotnenie shirokopolosnogo kanala svyazi dlia peredachi telemetricheskoi informatsii // Vopr. elektromekhaniki. 2010. Vol. 119. P. 57–61. (In Russian).
5. Dyomko A. I., Semenov O. Yu., Churilova I. N. Quasi-Optimal Processing Simulation of Ultrasonic Signals // J Phys: Conf Ser. 2020. Vol. 1488. P. 012004. DOI 10.1088/1742-6596/1488/1/012004.
6. Perez-Alcazar P. R., Santos A. Behavior of Quantization Noise for Sinusoidal Signals. A Revision // Journal of Applied Research and Technology. 2009. Vol. 7, No. 2. P. 136–152.
7. Bokhov O. S., Kosmin D. M., Kotelnikov I. V., Kozhyrev A. B., Osadchy V. N. Nizkopotrebliaushchie malogabaritnye radiotekhnicheskie moduli na osnove mikroelektromekhanicheskikh kliuchei // Biotekhnosfera. 2011. No. 1–2 (13–14). P. 99–103. (In Russian).
8. Ross T. N., Hetta K., Cormier G, Wight J. S. Design of X-band GaN Phase Shifters // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2015. Vol. 63, Is. 1. P. 244–255.
9. Sheikh I. A., Pannu N. K. Review of Polyphase Filtering Technique in Signal Processing // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. 2018. Vol. 7, Is. 12. P. 213–221.
10. Zhukova I. N. Quasi-Continuous Signals Synthesis Using the Method of Multiphase Signals Ensemble Composition // Vestnik NovSU. 2014. No. 81. P. 17–20. (In Russian).
11. Dyomko A. I., Semenov O. Yu. Methods of Building OFDM Systems and Radio Signal Processing in Matlab Simulink // Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and

12. Смирнов А. В. Оценка параметров глазковой диаграммы по переходной и амплитудно-частотной характеристикам с использованием нейронной сети // *Моделирование, оптимизация и информац. технологии*. 2018. № 3. С. 73–87.
13. Быстров Н. Е., Жукова И. Н., Чеботарев С. Д. Синтез сложных сигналов с квазинепрерывным энергетическим спектром // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. 2012. Вып. 2. С. 37–43.
14. Штарев Д. В., Маврычев Е. А. Пространственное линейное кодирование сигналов в совместной системе радиолокации и многоадресной радиосвязи // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. 2022. Т. 25, № 1. С. 17–27.
15. Dyomko A. I., Semenov O. Yu., Churilova I. N. Intelligent Power Source // *AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2285, Is. 1. P. 050005. DOI 10.1063/5.0027034.
16. Леухин А. Н., Парсаев Н. В. Бесконечные множества фазокодированных последовательностей с одноуровневой периодической автокорреляционной функцией // *Радиотехника*. 2009. № 12. С. 6–11.
17. Tang X., Mouthaan K. Design Considerations for Octave-Band Phase Shifters Using Discrete Components // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2010. Vol. 58, Is. 12. P. 3459–3466.
18. Muruhashi K., Mizutani H., Ohata K. Design and Performance of a Ka-Band Monolithic Phase Shifter Utilizing Nonresonant FET Switches // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2008. Vol. 48, Is. 8. P. 1313–1317.
12. Smirnov A. V. Prediction of Eye-Diagram Parameters from Transient and Gain-Frequency Characteristics Using Neural Network // *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2018. No. 3. P. 73–87. (In Russian).
13. Bystrov N. E., Zhukova I. N., Chebotarev S. D. Synthesis of Wideband Signals with Quasicontinuous Energy Spectrum // *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2012. Is. 2. P. 37–43. (In Russian).
14. Shtarev D. V., Mavrychev E. A. Spatial Linear Coding in Joint Radar and Multicast Communication Systems // *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2022. Vol. 25, No. 1. P. 17–27. (In Russian).
15. Dyomko A. I., Semenov O. Yu., Churilova I. N. Intelligent Power Source // *AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2285, Is. 1. P. 050005. DOI 10.1063/5.0027034.
16. Leukhin A. N., Parsaev N. V. Beskonechnye mnozhestva fazokodirovannykh posledovatelnosti s odnourovnevoi periodicheskoi avtokorrelatsionnoi funktsiei // *Radiotekhnika*. 2009. No. 12. P. 6–11. (In Russian).
17. Tang X., Mouthaan K. Design Considerations for Octave-Band Phase Shifters Using Discrete Components // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2010. Vol. 58, Is. 12. P. 3459–3466.
18. Muruhashi K., Mizutani H., Ohata K. Design and Performance of a Ka-Band Monolithic Phase Shifter Utilizing Nonresonant FET Switches // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2008. Vol. 48, Is. 8. P. 1313–1317.

#### **Информация об авторах**

**А. И. Дёмко** – кандидат технических наук, доцент, почетный работник высшего образования РФ.

**О. Ю. Семенов** – кандидат физико-математических наук, доцент.

#### **Information about the authors**

**A. I. Dyomko** – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation.

**O. Yu. Semenov** – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor.