

# Формирование и усиление сигналов

DOI 10.24412/2221-2574-2024-2-71-77

УДК 621.396

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПЕЦИАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ

**Ромашов Владимир Викторович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»<sup>1</sup>.

E-mail: [romashovmurom@mail.ru](mailto:romashovmurom@mail.ru)

**Ромашова Любовь Владимировна**

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»<sup>1</sup>.

E-mail: [romashovamurom@mail.ru](mailto:romashovamurom@mail.ru)

**Докторов Андрей Николаевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»<sup>1</sup>.

E-mail: [doctorov\\_a\\_n@mail.ru](mailto:doctorov_a_n@mail.ru)

**Якименко Кирилл Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»<sup>1</sup>.

E-mail: [yakimenko.kirill@yandex.ru](mailto:yakimenko.kirill@yandex.ru)

**Сочнева Наталья Александровна**

аспирант кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»<sup>2</sup>.

E-mail: [sochnewa.natalya@yandex.ru](mailto:sochnewa.natalya@yandex.ru)

<sup>1</sup>Адрес: 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

<sup>2</sup>Адрес: 600000, Российская Федерация, г. Владимир, ул. Горького, д. 87.

**Аннотация:** Работа посвящена моделированию спектральных характеристик быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) в специальных режимах работы. Приведены диаграммы формирования сигналов во временной области — тактовые импульсы и импульсы, восстановленные на выходе ЦАП. Представлены спектры выходного сигнала быстродействующего ЦАП при моделировании специальных режимов. Получены данные об уровне амплитуд спектральных компонент в каждой из зон Найквиста на выходе ЦАП в специальных режимах работы. Целью работы является выработка рекомендаций по выбору наиболее эффективного режима работы быстродействующего ЦАП применительно к номеру образа в соответствующей зоне Найквиста.

**Ключевые слова:** режимы работы ЦАП, быстродействующий ЦАП, цифровое формирование сигналов, спектральные характеристики, образы основной частоты.

### Введение

Развитие современных систем радиосвязи, радиолокации и радионавигации, телекоммуникационных систем, а также медицинской и измерительной аппаратуры предполагает освоение все более высоко-

частотных диапазонов. Задачи увеличения выходной частоты наряду со снижением уровня фазовых шумов на сегодняшний день являются приоритетными при разработке цифровых формирователей радиосигналов. Одним из способов их решения является

применение высокочастотных компонентов спектра выходного сигнала — образов основной частоты, возникающих в быстродействующих цифро-аналоговых преобразователях (ЦАП) в процессе восстановления сигнала из цифровой в аналоговую форму [1, 2].

Более эффективное использование высокочастотных образов основной частоты достигается применением специальных режимов работы быстродействующих ЦАП, полученных при помощи изменения архитектуры выходных каскадов [3]. Огибающая спектра выходного сигнала в этих режимах изменяется таким образом, чтобы увеличить уровень амплитуды высокочастотных копий спектра в необходимых высших зонах Найквиста. Таким образом достигается увеличение выходной частоты цифрового формирователя радиосигналов, и в то же время удаётся получить меньший или соизмеримый уровень спектральной плотности мощности фазовых шумов на высокой частоте по сравнению с традиционными методами с применением дополнительных устройств (умножителей частоты, ФАПЧ).

В работах [4–6] рассмотрены основные специальные режимы работы быстродействующих ЦАП:

1. нормальный режим работы, или non-return-to-zero (NRZ);

2. нормальный режим работы с двойным тактированием по фронту и по спаду тактового импульса (2xNRZ);

3. режим с возвратом к нулю (return-to-zero (RZ) mode) получен с помощью уменьшения длительности тактовых импульсов режима NRZ [3, 5, 6];

4. режим радиочастоты (radio frequency (RF) или mix mode) — форма тактового импульса режима NRZ представлена в виде двух разнополярных импульсов длительностью  $\tau = T/2$  [7];

5. режим радиочастоты с возвратом к нулю (RFZ — radio frequency return-to-zero mode) —

получен путём уменьшения ширины разнополярных импульсов относительно момента  $t = 0$ ;

6. RFZ2 (режим радиочастоты с возвратом к нулю 2) получен путём уменьшения длительности разнополярных импульсов режима RF относительно момента времени  $t = 0$ ;

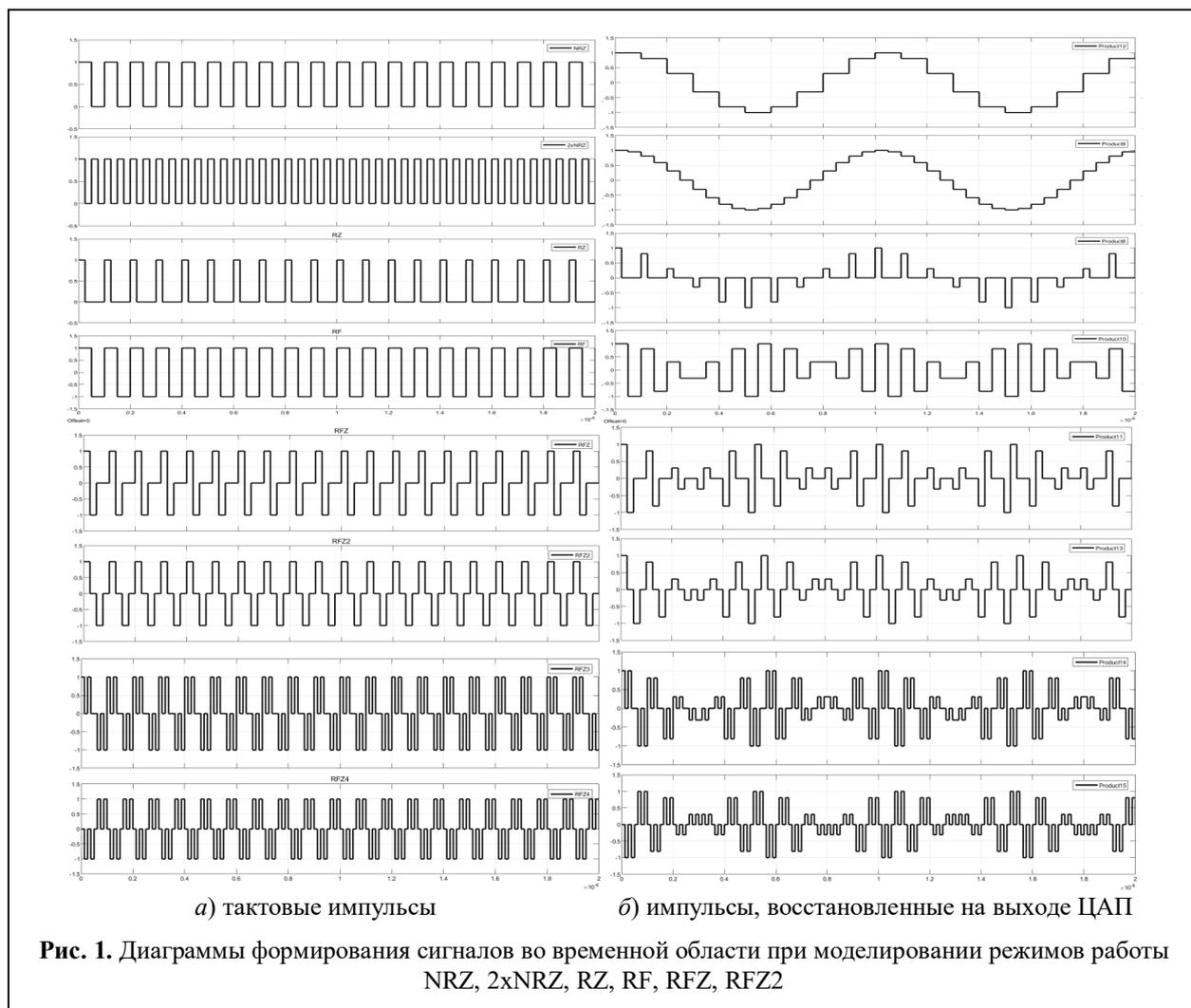
7. предложенный авторами режим работы RFZ3, форма тактового импульса в котором представляет собой четыре разнополярных импульса длительностью  $\tau = T/8$  на одном периоде восстановления  $T$  [5];

8. предложенный авторами режим работы RFZ4 отличен от режима работы RFZ3 наличием сдвига вдоль оси времени на интервал длительности одного импульса  $\tau = T/8$  [5].

В работах [9, 10] приведены формы тактовых импульсов, а также выражения для огибающей спектра выходного сигнала ЦАП в каждом из специальных режимов работы.

В программе Simulink была создана дискретная модель быстродействующего ЦАП, способная синтезировать сигналы для различных режимов работы ЦАП. С её помощью было проведено моделирование исследуемых режимов работы быстродействующего ЦАП, в качестве входного сигнала был выбран гармонический сигнал с частотой  $f_{out} = f_T \cdot K_{ЦАП}$ , где  $f_T$  — тактовая частота;  $K_{ЦАП}$  — коэффициент передачи ЦАП. На рис. 1 представлены диаграммы формирования выходного сигнала ЦАП в режимах работы NRZ, 2xNRZ, RZ, RF, RFZ, RFZ2, RFZ3, RFZ4 во временной области.

Для быстродействующих ЦАП в режимах работы NRZ, 2xNRZ, RZ, RF, RFZ, RFZ2, RFZ3, RFZ4 получены спектры выходного сигнала при  $K_{ЦАП} = 0,25$ . Примеры спектров выходного сигнала ЦАП при моделировании режимов NRZ, RZ, RF, RFZ3, RFZ4 (при  $K_{ЦАП} = 0,25$  и  $f_T = 10$  МГц) приведены на рис. 2. Как видно, кроме основной частоты  $f_{out}$  при  $n = 0$  (номер образа) присутствует множество частот образов  $f_{обр} = f_T |n + K_{ЦАП}|$ . При  $n < 0$  образ отрицательный, при  $n > 0$  образ положительный.



Для режима NRZ максимальная амплитуда у основной частоты при  $n = 0$ . Амплитуда остальных образов уменьшается по закону  $\sin(x)/x$ . Для режима восстановления RZ максимальная амплитуда первых образов, для режима RF максимальны первые и третьи образы, для RFZ3 максимальны первые и четвертые образы и так далее. В некоторых случаях амплитуды соответствующих образов существенно (на 6, 8, 10 дБ) превышают амплитуды этих же образов в режиме NRZ. Это позволяет использовать их для формирования высокочастотных сигналов выделением с помощью полосовых фильтров.

В результате математического моделирования выходных сигналов ЦАП в частотной области были получены данные об

уровне амплитуд образов основной частоты в различных зонах Найквиста каждого из специальных режимов работы, которые приведены в таблице 1. Серым выделены наибольшие амплитуды образов по сравнению с режимом NRZ.

Введём понятие коэффициента эффективности использования каждого из известных специальных режимов работы быстродействующих ЦАП применительно к номерам образов основной частоты. Он одновременно учитывает увеличение частоты образа и уменьшение его амплитуды по сравнению с частотой и амплитудой нулевого образа. Другими словами, он одновременно учитывает и выигрыш по частоте, и проигрыш по уровню амплитуды.

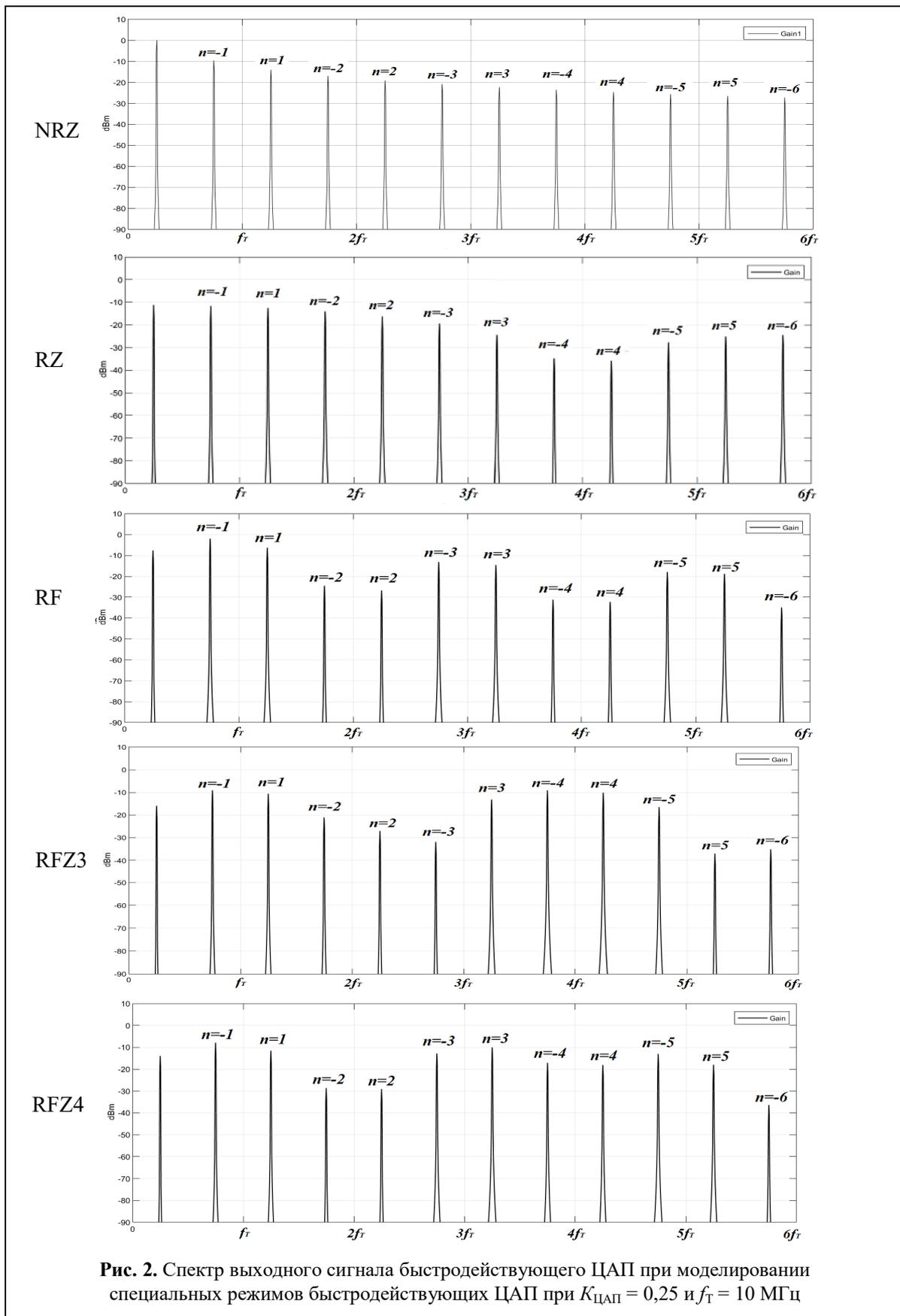


Рис. 2. Спектр выходного сигнала быстродействующего ЦАП при моделировании специальных режимов быстродействующих ЦАП при  $K_{\text{ЦАП}} = 0,25$  и  $f_T = 10$  МГц

Таблица 1.

	Уровень образов, дБ											
Режим	$n = 0$	$n = -1$	$n = 1$	$n = -2$	$n = 2$	$n = -3$	$n = 3$	$n = -4$	$n = 4$	$n = -5$	$n = 5$	$n = -6$
<b>NRZ</b>	0	-10	-14	-17	-19	-21	-22	-23	-24	-25	-26	-27
<b>2xNRZ</b>	0			-16	-18			-22	-23			-26
<b>RZ</b>	-11	-11	-12	-13	-16	-19	-23	-34	-35	-27	-24	-23
<b>RF</b>	-8	-2	-6	-24	-26	-12	-14	-31	-32	-18	-19	-34
<b>RFZ</b>	-19	-11	-8	-8	-11	-14	-23	-42	-43	-27	-20	-19
<b>RFZ2</b>	-13	-6	-7	-16	-18	-13	-19	-37	-38	-22	-20	-27
<b>RFZ3</b>	-16	-9	-10	-21	-27	-32	-12	-9	-10	-16	-37	-34
<b>RFZ4</b>	-13	-8	-11	-28	-29	-12	-10	-17	-18	-13	-18	-36

Таблица 2.

	Коэффициент эффективности											
Режим	$n = 0$	$n = -1$	$n = 1$	$n = -2$	$n = 2$	$n = -3$	$n = 3$	$n = -4$	$n = 4$	$n = -5$	$n = 5$	$n = -6$
<b>NRZ</b>	1	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0
<b>2xNRZ</b>	1			1,1	1,1			1,2	1,2			1,2
<b>RZ</b>	0,3	0,8	1,3	1,6	1,4	1,2	0,9	0,3	0,3	0,8	1,3	1,6
<b>RF</b>	0,4	2,4	2,5	0,4	0,5	2,8	2,6	0,4	0,4	2,4	2,4	0,5
<b>RFZ</b>	0,1	0,8	2,0	2,8	2,5	2,2	0,9	0,1	0,1	0,8	2,1	2,6
<b>RFZ2</b>	0,2	1,5	2,2	1,1	1,1	2,5	1,5	0,2	0,2	1,5	2,1	1,0
<b>RFZ3</b>	0,2	0,5	0,9	0,5	0,3	0	2,1	2,6	3,1	1,9	0,1	0,3
<b>RFZ4</b>	0,2	0,6	0,7	0,3	0,4	1,2	2,4	1,7	1,8	2,4	1,4	0,4

Приведём выражение для данного коэффициента:

$$K_{эфф\_обр} = 20 \lg \left( \frac{|n + K_{ЦАП}|}{K_{ЦАП}} \right) + A_0 - A_{обр}, \quad (1)$$

где  $A_0$  — амплитуда нулевого образа;  $A_{обр}$  — амплитуда соответствующего образа.

Расчитанные значения данного коэффициента для  $K_{ЦАП} = 0,25$  приведены в таблице 2.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы: для  $n = 0$  наиболее эффективным станет использование режимов работы NRZ, 2xNRZ и RF, для первого отрицательного образа (2 зона Найквиста) — режимы NRZ, RF и RFZ2 (в режиме работы RF увеличение амплитуды гармоник образа основной частоты относительно огибающей спектра в нормальном режиме работы NRZ достигает 8 дБ). Для 3 зоны Найквиста ( $n = 1$ ) наибольший выигрыш по уровню амплитуды образа обеспечивают режимы RF, RFZ и RFZ2 (до 8 дБ). В 4 и 5 зонах Найквиста ( $n = -2$  и  $n = 2$ ) наиболее эффективны

режимы RZ и RFZ (выигрыш в уровне гармоник до 9 дБ). Для  $n = -3$  и  $n = 3$  (6 и 7 зоны Найквиста) наибольшее увеличение амплитуд образов основной частоты (до 9 дБ) обеспечивает использование режимов работы RF и RFZ4. В 8 и 9 зонах Найквиста ( $-4$  и 4 номера образов основной частоты) наиболее эффективно использование режимов работы RFZ3 и RFZ4 (до 14 дБ). Для  $n = -5$  и  $n = 5$  (10 и 11 зона Найквиста) наиболее эффективны режимы RF и RFZ3 (увеличение амплитуды образов до 12 дБ) и, наконец, для 12 зоны Найквиста наибольший выигрыш по уровню гармоник образа ( $n = -6$ ) даёт режим работы RFZ (до 8 дБ).

### Заключение

Таким образом, результаты моделирования спектральных характеристик выходного сигнала быстродействующего ЦАП в специальных режимах работы подтверждают эффективность их использования в высших зонах Найквиста. Уровень амплитуд спектральных компонент применительно к номерам образов от  $-3$  увеличивается

на 8–14 дБ по сравнению с теми же образцами в режиме работы NRZ, что позволяет их использовать для формирования высокочастотных сигналов.

### Литература

1. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A. The Use of Images of DDS in the Hybrid Frequency Synthesizers // 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology Conference Proceedings. 2014. Pp. 302–303.

2. Romashov V.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. The Use of Images of DDS Fundamental Frequency for High-Frequency Signals Formation // 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology Conference Proceedings. 2014. Pp. 310–311.

3. Ajay K. Geir O. High-Speed DACs ease transmitter designs // Microwave & RF. 2010. No. 49(8). Pp. 66–71.

4. Ромашов В.В., Докторов А.Н., Якименко К.А., Сочнева Н.А., Матерухин С.Е. Математическое моделирование шумовых характеристик формирователей высокочастотных сигналов на основе быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019, №4. С. 52–59.

5. Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н.,

Якименко К.А., Сочнева Н.А. Повышение эффективности использования высших зон Найквиста при прямом цифровом синтезе высокочастотных сигналов // Радиотехника. 2022, №5. С. 135–144.

6. Храмов К.К., Ромашов В.В. Сравнительный анализ режимов работы быстродействующих ЦАП // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2018. № 4. С. 44–54.

7. High Speed DAC [Электронный ресурс]: сайт компании Analog Devices, Inc., 2017. URL: <http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/high-speed-da-converters.html> (дата доступа 17.03.2024).

8. High-Speed DACs [Электронный ресурс]: сайт компании Maxim Integrated, 2017. URL: <https://para.maximintegrated.com/en/results.mvp?fam=hsdacs&tree=master> (дата доступа 17.03.2024).

9. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. Simulation of Noise Curves of the New Integrated DDS from Analog Devices // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013.

10. Synchronizing Multiple High-Speed Multiplexed DACs for Transmit Applications [Электронный ресурс]. URL: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/3901> (дата доступа 17.03.2024).

Поступила 17 марта 2024 г.

English

## EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF SPECIAL OPERATING MODES OF DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTERS FOR HIGH-FREQUENCY SIGNALS GENERATING

**Vladimir Viktorovich Romashov** — Grand Dr. in Engineering, Professor, Head of Radio Engineering Department, Murom Institute<sup>1</sup> (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: [romashovmurom@mail.ru](mailto:romashovmurom@mail.ru)

**Lyubov Vladimirovna Romashova** — PhD, Associate Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute<sup>1</sup> (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: [romashovamurom@mail.ru](mailto:romashovamurom@mail.ru)

**Kirill Aleksandrovich Yakimenko** — PhD, Associate Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute<sup>1</sup> (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: [yakimenko.kirill@yandex.ru](mailto:yakimenko.kirill@yandex.ru)

**Andrey Nikolayevich Doktorov** — PhD, Associate Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute<sup>1</sup> (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: [doctorov\\_a\\_n@mail.ru](mailto:doctorov_a_n@mail.ru)

**Natalya Aleksandrovna Sochneva** — Postgraduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”<sup>2</sup>.

E-mail: [sochnewa.natalya@yandex.ru](mailto:sochnewa.natalya@yandex.ru)

<sup>1</sup>Address: 602264, Russian Federation, Vladimir Region, Murom, Orlovskaya street. 23.

<sup>2</sup>Address: 602264, Russian Federation, Vladimir, Gorky street. 87.

**Abstract:** The development of modern radio communication systems, radar and radio navigation, telecommunication systems, as well as medical and measuring equipment involves the development of increasingly high frequency ranges. The tasks of increasing the output frequency along with reducing the level of phase noise are currently a priority in the development of digital radio signal generators. One of the ways to solve them is the use of high—frequency components of the output signal spectrum - images of the fundamental frequency that occur in high-speed digital-to-analog converters (DACs) in the process of restoring the signal from digital to analog form. The work is devoted to modeling the spectral characteristics of high-speed digital-to-analog converters (DACs) in special operating modes. Diagrams of the formation of signals in the time domain are given — clock pulses and pulses restored at the output of the DAC. The spectra of the output signal of a high-speed DAC in the simulation of special modes are presented. Data on the amplitude level of spectral components in each of the Nyquist zones at the output of the DAC in special operating modes were obtained. The purpose of the work is to develop recommendations for choosing the most effective mode of operation of a high-speed DAC in relation to the image number in the corresponding Nyquist zone.

**Keywords:** DAC operating modes, high-speed DAC, digital signal forming, noise properties, fundamental frequency images.

#### References

1. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A. The Use of Images of DDS in the Hybrid Frequency Synthesizers. 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology Conference Proceedings. 2014. Pp. 302–303.
2. Romashov V.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. The Use of Images of DDS Fundamental Frequency for High-Frequency Signals Formation. 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology Conference Proceedings. 2014. Pp. 310–311.
3. Ajay K. Geir O. High-Speed DACs ease transmitter designs. Microwave & RF. 2010. No. 49(8). Pp. 66–71.
4. Romashov V.V., Doktorov A.N., Yakimenko K.A., Sochneva N.A., Materukhin S.E. Mathematical modeling of noise characteristics of high-frequency signal generators based on high-speed digital-analog converters. Radio and telecommunication systems. 2019, No. 4. Pp. 52–59.
5. Romashov V.V., Khramov K.K., Doktorov A.N., Yakimenko K.A., Sochneva N.A. Improving the efficiency of using higher Nyquist zones in direct digital synthesis of high-frequency signals. Radiotekhnika. 2022. No. 5. Pp. 135–144.
6. Khramov K.K., Romashov V.V. Comparative analysis of operating modes of high-speed DACs. Radio and telecommunication systems. 2018. No. 4. Pp. 44–54.
7. High Speed DAC [Electronic source]: Analog Devices, Inc., 2017. URL: <http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/high-speed-da-converters.html> (Access date 17.03.2024).
8. High-Speed DACs [Electronic source]: Maxim Integrated, Inc., 2017. URL: <https://para.maximintegrated.com/en/results.mvp?fam=hsdacs&tree=master> (Access date 17.03.2024).
9. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. Simulation of Noise Curves of the New Integrated DDS from Analog Devices // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013.
10. Synchronizing Multiple High-Speed Multiplexed DACs for Transmit Applications [Electronic source]. URL: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/3901> (Access date 17.03.2024).