

УДК 621.391

Коэффициенты передачи шумовых характеристик быстродействующих цифроаналоговых преобразователей в различных режимах работы

Ромашов В.В., Докторов А.Н., Матерухин С.Е., Сочнева Н.А.

В работе рассмотрены основные режимы работы, применяемые в современных быстродействующих ЦАП для цифрового формирования широкополосных сигналов. Среди них можно выделить: non-return-to-zero, return-to-zero, radio frequency, radio frequency return-to-zero и его разновидность radio frequency return-to-zero 2. Выведены коэффициенты передачи шумовых характеристик быстродействующих цифроаналоговых преобразователей для различных режимов работы, а также исследованы зависимости данных коэффициентов от скважности и номера образа. Установлено, что наиболее эффективными являются режимы RFZ и RFZ2.

Ключевые слова: режимы работы ЦАП, быстродействующий ЦАП, цифровое формирование сигналов, шумовые характеристики.

В последние годы большое распространение получили радиотехнические и телекоммуникационные устройства, содержащие формирователи высокочастотных сигналов, построенные с использованием быстродействующей цифровой техники. Цифроаналоговые преобразователи с частотой преобразования до 6...12 ГГц [1-3] используются для формирования широкополосных сигналов с несколькими несущими в системах кабельного телевидения, широкополосных сигналов с промежуточной частотой в радиолокационных станциях СВЧ диапазона, а также в составе цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС). Для синтезаторов данного типа известна методика математического моделирования спектральной плотности мощности фазовых шумов [4, 5].

Развитие технологии цифроаналогового преобразования, совершенствование архитектуры привело к созданию нескольких новых режимов работы цифроаналоговых преобразователей, оптимальных для использования побочных высокочастотных компонент спектра – образов основной частоты [6-8]. Известна методика моделирования СПМ фазовых шумов ЦВС при использовании об-

разов основной частоты [9]. Использование образов основной частоты позволяет увеличить частоту выходного сигнала всего формирователя, а применение новых режимов работы ЦАП в данном случае позволяет увеличить отношение сигнал/шум без использования дополнительных устройств. Пример структурной схемы формирователя сигналов с использованием образов основной частоты и специальных режимов работы ЦАП приведен на рис. 1 [9-10]. Тактовая частота ВЧ ЦАП задается генератором с цифровым управлением (ЦГ) и определяется при частотном планировании [11]. Сформированный в ПЛИС цифровой модулирующий сигнал поступает в преобразователь частоты дискретизации (ПЧД), в котором обобщены функции мультиплексирования, синхронизации, интерполяции и цифровой фильтрации сигнала. Фильтр, расположенный на выходе ЦАП позволяет выделить полосу с требуемым образом основной частоты.

Требуется определить коэффициенты передачи шумовых характеристик быстродействующих цифроаналоговых преобразователей для различных режимов работы и зависимостей этих коэффициентов от скважности

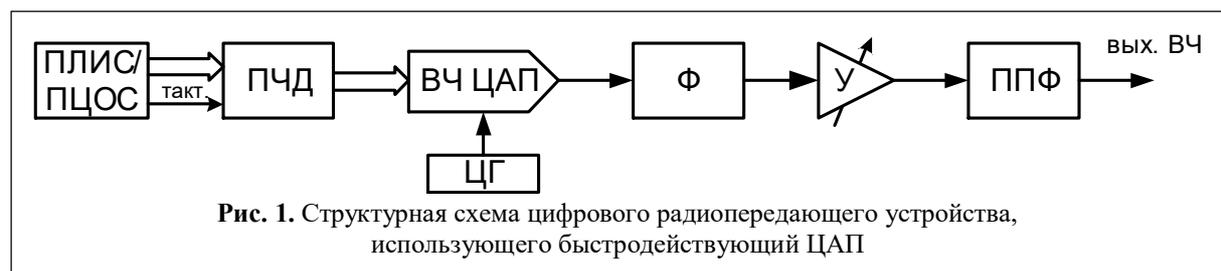
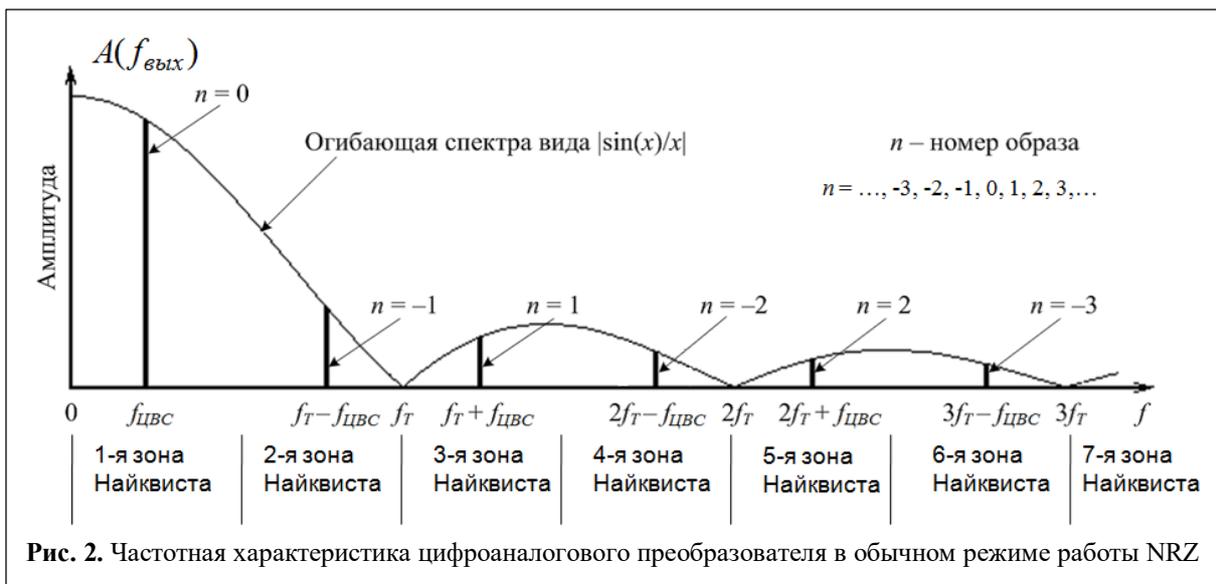


Рис. 1. Структурная схема цифрового радиопередающего устройства, использующего быстродействующий ЦАП



и номера образа.

Рассмотрим основные режимы работы быстродействующего цифроаналогового преобразователя, входящего в состав цифрового вычислительного синтезатора.

1. Нормальный режим работы, или *non-return-to-zero* (NRZ). Частотная характеристика ЦАП в режиме NRZ показана на рис. 2. Максимум частотной характеристики приходится на первую зону Найквиста. При использовании образов, расположенных в других зонах Найквиста, в данном режиме огибающая частотной характеристики вида $(\sin x)/x$ вызывает уменьшение амплитуды образов.

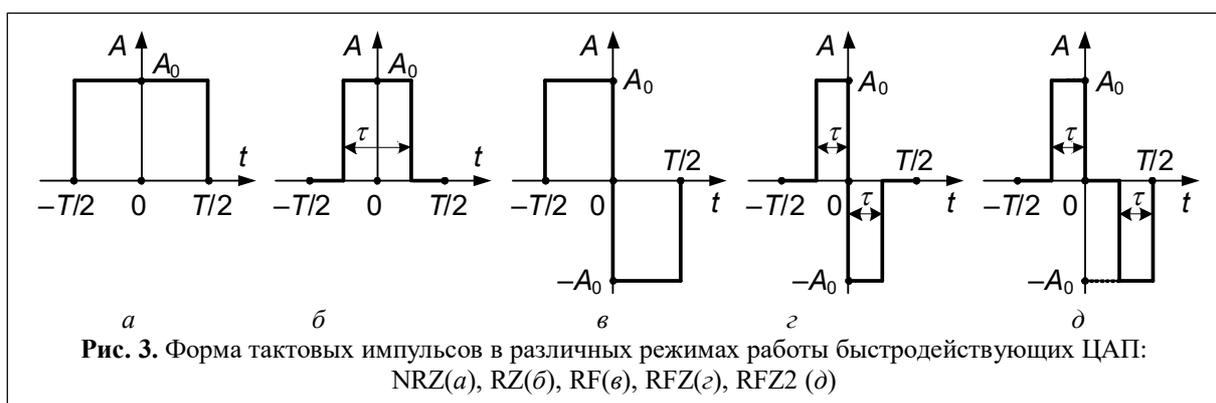
2. Режим работы ЦАП, в котором применяется уменьшение длительности τ тактовых импульсов (рис. 3,б) так, что выходной сигнал оказывается как бы «вырезан» из сигнала режима NRZ в интервалы времени $-\tau/2 < t < \tau/2$. получил название *return-to-zero* (RZ) mode. [1-3]. Преимущество режима

RZ заключается в том, увеличивается амплитуда гармоники -1-го образа во второй зоне Найквиста.

3. Принципиально другим режимом работы, применяемым в некоторых быстродействующих ЦАП, является *radio frequency* (RF) или *mix mode* [1-3]. При его реализации каждый тактовый импульс режима NRZ представляется двумя разнополярными импульсами длительностью $\tau = T/2$ (рис. 3,в). Режим радиочастоты RF является оптимальным для работы на высокой частоте выходного сигнала, во второй и третьей зонах Найквиста.

4. Путем уменьшения длительности разнополярных импульсов режима RF относительно момента $t=0$ так, как показано на рис. 3,з, разработчики реализуют еще один режим работы быстродействующих ЦАП, известный как RFZ (*radio frequency return-to-zero mode*) [1-2].

5. Еще один режим работы ЦАП, условно



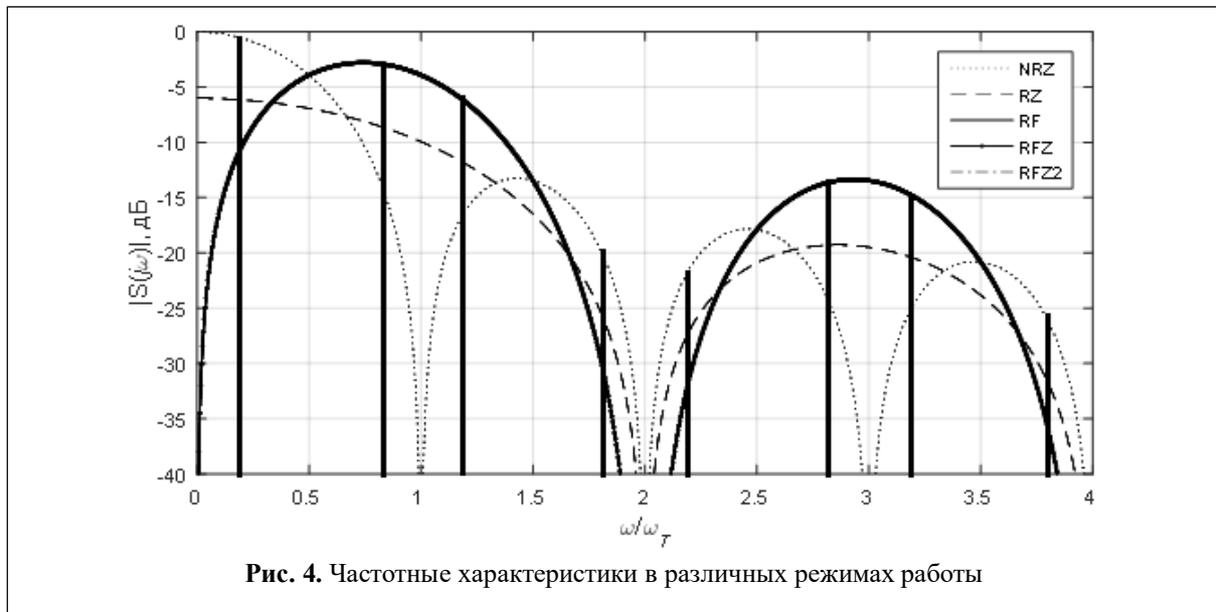


Рис. 4. Частотные характеристики в различных режимах работы

названный RFZ2 [12]. В нем длительность разнополярных импульсов, также как в режиме RFZ, составляет $\tau < T/2$, однако изменение их длительности осуществляется относительно моментов времени $t = 0$ и $t = T/2$ (рис. 3,д).

Частотные характеристики описанных быстродействующих ЦАП для различных режимов работы и гармоники образов основной частоты приведены на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что использование различных специальных режимов работы приводит к изменению огибающей спектра выходного сигнала – частотной характеристики ЦАП. Для оценки изменения огибающей спектра выходного сигнала, используют коэффициенты передачи шумовых характеристик. Коэффициент передачи цифроаналогового преобразователя для RZ режима, который представляет собой отношение комплексной огибающей выходного сигнала к комплексной огибающей входного сигнала ЦАП, имеет вид [13]

$$K_{RZ}(\omega, q) = 10 \lg \left(\left(\frac{|\dot{S}_{RZ}(\omega)|}{|\dot{S}_{NRZ}(\omega)|} \right)^2 \right) = 10 \lg \left(\left(\frac{\sin(\omega T/2q)}{\sin(\omega T/2)} \right)^2 \right), \quad (1)$$

где T – период дискретизации, q – скважность импульсов передискретизатора. Полу-

чим соотношение для номеров образов основной частоты ЦАП. Преобразуем (1) к виду:

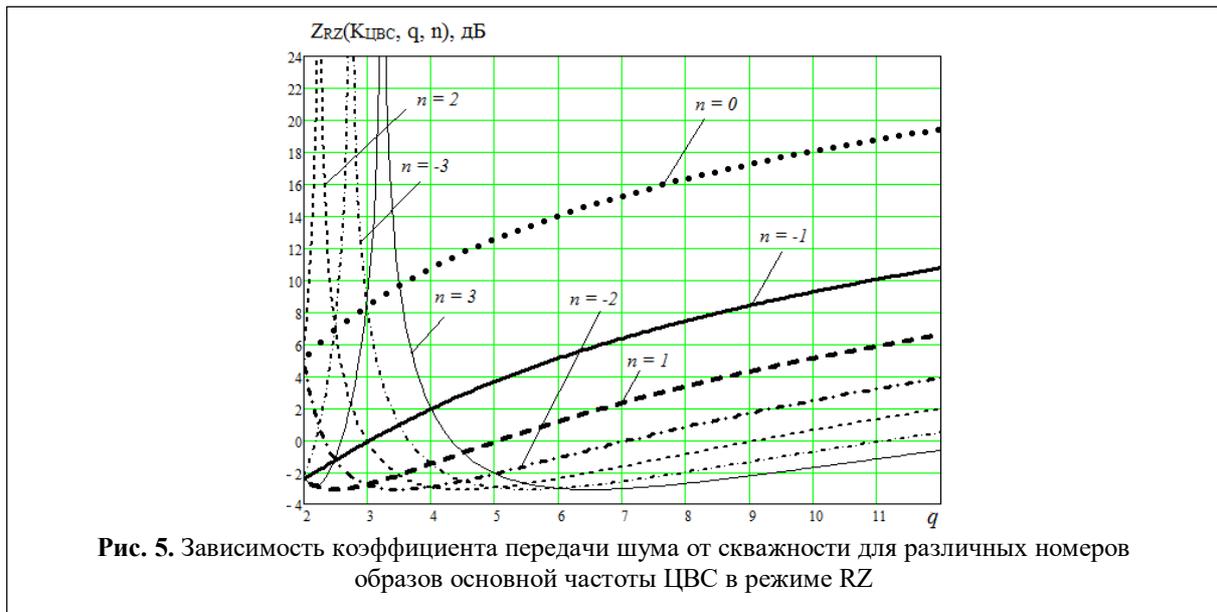
$$K_{RZ}(f, q) = 10 \lg \left(\left(\frac{\sin(\pi f / f_T q)}{\sin(\pi f / f_T)} \right)^2 \right). \quad (2)$$

Поскольку $f = f_T |n + K_{ЦБС}|$, тогда $f / f_T = |n + K_{ЦБС}|$ и соответственно

$$K_{RZ}(K_{ЦБС}, q, n) = 10 \lg \left(\frac{\left(\sin \left(\pi \frac{|n + K_{ЦБС}|}{q} \right) \right)^2}{\left(\sin(\pi |n + K_{ЦБС}|) \right)^2} \right). \quad (3)$$

Данное соотношение характеризует коэффициент передачи амплитуды сигнала от скважности, номера образа. Для перехода к СПМ фазовых шумов используется квадрат коэффициента передачи фазовых шумов, который является обратной величиной квадрата коэффициента передачи амплитуды. Поэтому результирующий коэффициент передачи фазовых шумов определяется следующей формулой:

$$Z_{RZ}(K_{ЦБС}, q, n) = \frac{1}{K_{RZ}} = 10 \lg \left(\frac{\sin \left(\pi \frac{|n + K_{ЦБС}|}{q} \right)}{\sin(\pi |n + K_{ЦБС}|)} \right)^2. \quad (4)$$



Аналогично выводим коэффициент передачи фазовых шумов для RF режима:

$$Z_{RF}(K_{CBC}, q, n) = 10 \lg \left(\frac{\sin(\pi |n + K_{CBC}|)}{2 \sin^2 \left(\pi \frac{|n + K_{CBC}|}{2} \right)} \right)^2 \quad (5)$$

Коэффициент передачи фазовых шумов для режима RFZ имеет вид:

$$Z_{RFZ}(K_{CBC}, q, n) = 10 \lg \left(\frac{\sin(\pi |n + K_{CBC}|)}{2 \sin^2 \left(\pi \frac{|n + K_{CBC}|}{q} \right)} \right)^2 \quad (6)$$

В режиме RFZ2 коэффициент передачи фазовых шумов равен:

$$Z_{RFZ2}(K_{CBC}, q, n) = 10 \lg \left(\frac{\sin(\pi |n + K_{CBC}|)}{2 \sin \left(\pi \frac{|n + K_{CBC}|}{q} \right) \cdot \sin \left(\pi \frac{|n + K_{CBC}|}{2} \right)} \right)^2 \quad (7)$$

На рис. 5 и 6 приведены зависимости коэффициента передачи шума от скажности для различных номеров образов основной частоты для $K_{CBC} = 0,25$.

В таблице 1. приведены минимальные значения коэффициента передачи шума для образов основной частоты, достижимые при использовании определенных значений

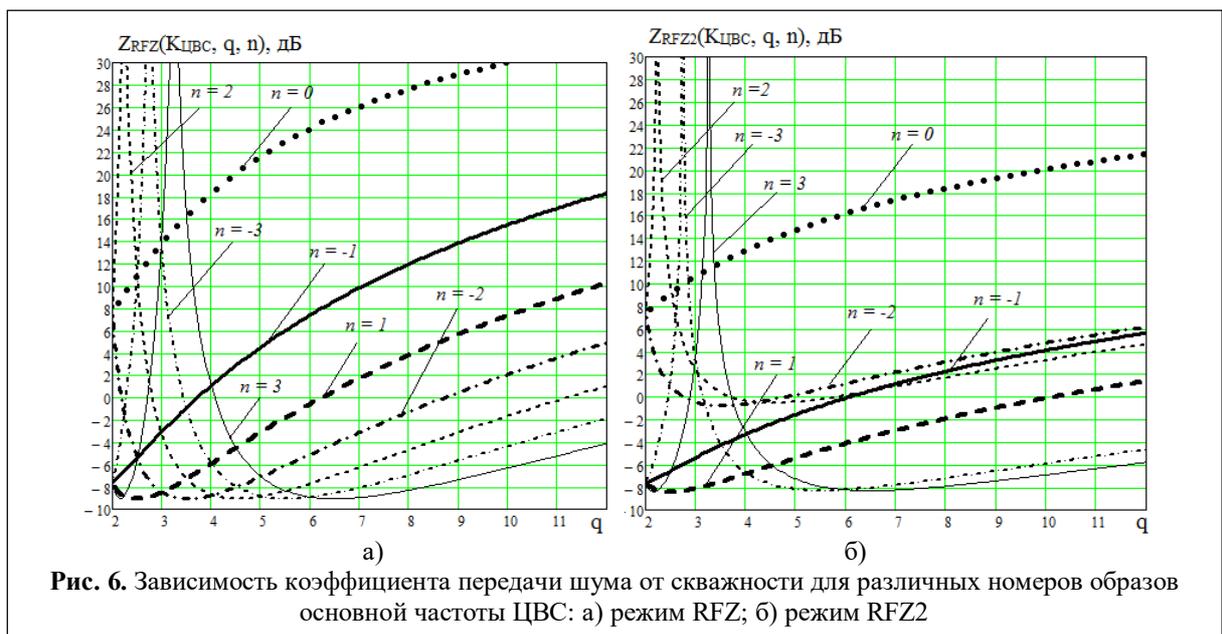


Таблица 1. Минимальные значения коэффициента передачи шума ЦАП

	RZ	RFZ	RFZ2
n = 0	5 дБ при q = 2	8 дБ при q = 2	8 дБ при q = 2
n = -1	-2 дБ при q = 2	-7 дБ при q = 2	-7 дБ при q = 2
n = 1	-3 дБ при q = 2..3	-9 дБ при q = 2..3	-8,5 дБ при q = 2..3
n = -2	-3 дБ при q = 3..4	-9 дБ при q = 3..4	-0,6 дБ при q = 3..4
n = 2	-3 дБ при q = 4..5	-9 дБ при q = 4..5	-0,5 дБ при q = 4..5
n = -3	-3 дБ при q = 5..6	-9 дБ при q = 5..6	-8 дБ при q = 5..6
n = 3	-3 дБ при q = 6..7	-9 дБ при q = 6..7	-8 дБ при q = 6..7

скважности для всех четырех специальных режимов работы ЦАП.

Анализируя зависимости на рис. 5, 6, можно отметить, что применение режимов RZ и RF при $K_{ДВС} = 0,25$ для некоторых образов позволяет снизить уровень шума на 2..3 дБ, в то время как использование режимов RFZ и RFZ2 позволяет дополнительно снизить уровень шума на 8..9 дБ в зависимости от выбранного образа и скважности.

Таким образом, применение специальных режимов работы быстродействующих ЦАП позволяет изменять огибающую частотной характеристики так, чтобы увеличилась амплитуда соответствующего высокочастотного компонента спектра. В целом все это приводит к росту отношения сигнал/шум или эквивалентному снижению уровня шумов. Наиболее эффективными для достижения данной цели оказались режимы RFZ и RFZ2.

Литература

1. High-Speed DACs [Электронный ресурс]: сайт компании Maxim Integrated, 2017. URL: <https://para.maximintegrated.com/en/results.mvp?fam=hsdacs&tree=master>
2. 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>
3. Kuckreja Ajay, Ostrem Geir, "High-Speed DACs ease transmitter designs," *Microwave & RF*, August 2010.
4. Ромашов В.В., Ромашова Л.В. Моделирование шумовых характеристик интегральных цифровых вычислительных синтезаторов // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2011, № 4. С. 20-23.
5. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. "Simulation of Noise Curves of the New Integrated DDS from Analog Devices,"

Поступила 20 августа 2018 г.

- 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR.

6. 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.

7. 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.

8. Ромашов В.В., Храмов К.К. Формирователи сетки опорных частот возбуждителя передатчика с использованием образов основной частоты // *Методы и устройства передачи и обработки информации*. 2011, № 13. С. 44-47.

9. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Модель спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов на образах основной частоты // *Радиопромышленность*. 2012. № 2. С. 38-48.

10. Ромашов В.В., Храмов К.К. Формирование сигналов в ОБЧ и УВЧ диапазонах при использовании метода прямого цифрового синтеза частот // *Радиотехника*. 2007, №6. С.39-41.

11. Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Частотное планирование формирователей сигналов радиосистем на основе цифровых вычислительных синтезаторов // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2012, № 4. С. 10-15.

12. Khramov K.K., Romashov V.V. Mathematical modeling of operational modes of high-speed DACs. В сборнике: Информационные технологии и нанотехнологии. Сборник трудов ИТНТ-2018. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. 2018. С. 1403-1411.

The main operational modes used in modern high-speed digital-to-analog converters for digital generation of broadband signals are considered. There is non-return-to-zero mode, return-to-zero mode, radio frequency mode, radio frequency return-to-zero mode and radio frequency return-to-zero 2 mode. The coefficients of transmission of noise characteristics of high-speed digital-analog converters were derived for different modes of operation, as well as the dependence of these coefficients on the duty cycle and image number. The most effective DAC's modes are RFZ and RFZ2.

Key words: operational modes of DAC, high-speed DAC, digital signal generation, non-return-to-zero, return-to-zero, radio frequency return-to-zero.

Ромашов Владимир Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: romashovmurom@mail.ru

Докторов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, преподаватель кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: doctorov_a_n@mail.ru

Матерухин Сергей Евгеньевич – студент 4 курса по направлению подготовки бакалавриата 11.03.01 «Радиотехника» факультета радиотехники и компьютерных систем Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: materukhin.sergey@mail.ru

Сочнева Наталья Александровна – магистрант 1 курса по направлению подготовки 11.04.01 «Радиотехника» факультета радиотехники и компьютерных систем Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: sochnewa.natalya@yandex.ru

Адрес: 602264, Муром, ул. Орловская, д. 23.