

Формирование и усиление сигналов

УДК 621.396

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Ромашов Владимир Викторович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиотехника» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

Докторов Андрей Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

Якименко Кирилл Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

Сочнева Наталья Александровна

магистрант кафедры «Радиотехника» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

Матерухин Сергей Евгеньевич

магистрант кафедры «Радиотехника» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

E-mail: romashovmuro@mail.ru.

Адрес: 602264, Россия, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

Аннотация: Работа посвящена разработке и исследованию математических моделей шумовых характеристик формирователей сигналов, построенных на основе быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей. Рассмотрены основные режимы работы, применяемые в быстродействующих ЦАП для цифрового формирования широкополосных радиосигналов. Среди них можно выделить: режим без возврата к нулю, режим с возвратом к нулю, режим радиочастоты, режим радиочастоты с возвратом к нулю и его разновидность – режим радиочастоты с возвратом к нулю 2. Выведены коэффициенты передачи шумовых характеристик быстродействующих цифроаналоговых преобразователей для различных режимов работы. Описаны математические модели спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых формирователей сигналов, использующих образы основной частоты и специальные режимы работы быстродействующих радиочастотных цифроаналоговых преобразователей.

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

Введение

Устройства формирования радиосигналов, построенные на основе прямого цифрового синтеза, в настоящее время получили широкое распространение в технике радиосвязи, радиолокации и навигации, телекоммуникационной, измерительной и медицинской аппаратуре.

Основой таких устройств являются цифровые вычислительные синтезаторы, реализующие прямой цифровой синтез, когда из базового тактового высокостабильного сигнала методом цифровой обработки создается поток цифрового кода, определяющий амплитуду, частоту и фазу синтезируемого аналогового сигнала.

Выходной аналоговый сигнал образуется в результате цифроаналогового преобразования.

Развитие современной цифровой техники, наращивание производительности и рабочей тактовой частоты, а также разработки специальных архитектур формирования выходного сигнала привели к созданию быстродействующих цифроаналоговых преобразователей.

Современные быстродействующие 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. Для синтезаторов данного типа известна методика математического моделирования спектральной плотности мощности фазовых шумов [4, 5].

Совершенствование архитектуры цифроаналоговых радиочастотных преобразователей привело к созданию нескольких новых режимов работы, оптимальных для использования побочных высокочастотных компонент спектра выходного сигнала – образов основной частоты [6–9]. Частота побочных компонент –

копий спектра выходного сигнала цифроаналогового преобразователя, называемых образами основной частоты, определяется выражением:

$$f_{обр\ n} = |n|f_T + \text{sgn}(n)f_{осн}, \quad (1)$$

где $f_{осн}$ – основная частота ЦВС; $n = \pm 1, \pm 2 \dots$ – номера образов основной частоты; $\text{sgn}(x)$ – функция выделения знака аргумента x . Для выделения необходимого спектрального компонента с частотой соответствующего образа используется полосовой фильтр. При $n = 0$ используется основная частота, для выделения которой применяется ФНЧ.

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.

На рис. 1 приведены обобщённые структурные схемы формирователей сигналов, в которых используются быстродействующие цифроаналоговые преобразователи в специальных режимах работы.

Первая схема представляет собой схему цифрового формирователя сигналов, построенного на основе цифрового вычислительного синтезатора, в котором для повышения частоты

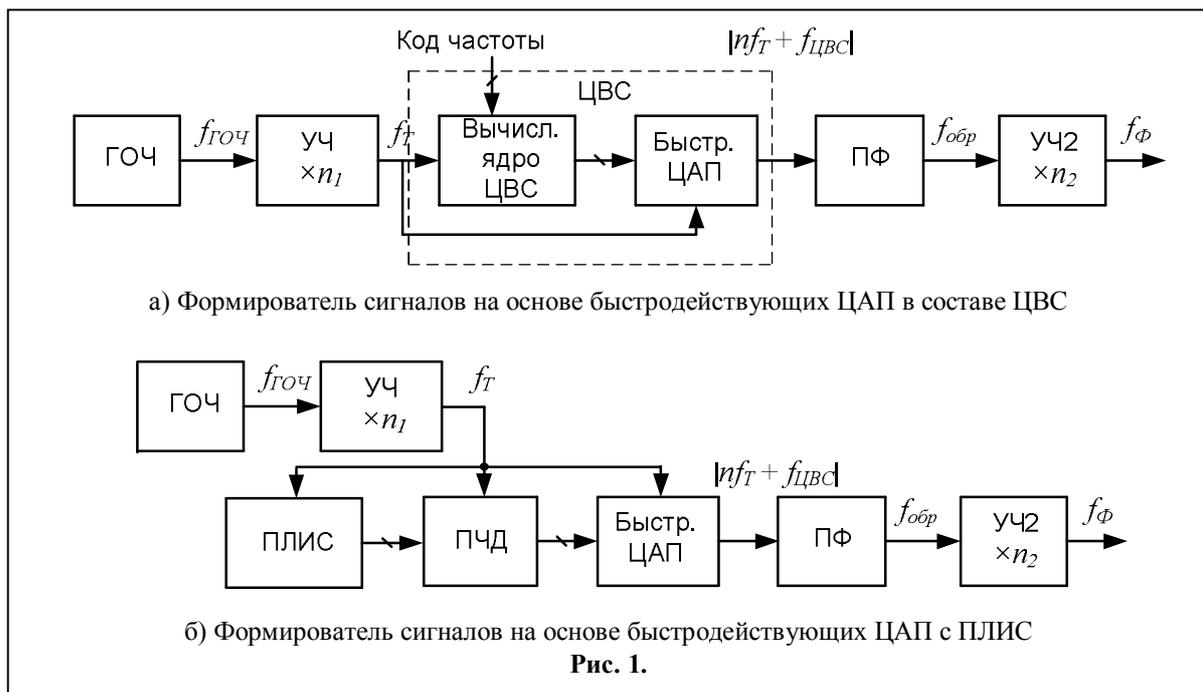


Рис. 1.

ты выходного сигнала и уменьшения коэффициента умножения выходного умножителя частоты используются побочные компоненты спектра – образы основной частоты. Цифровой вычислительный синтезатор в данной схеме реализован не в интегральном виде, а в виде отдельных цифровых элементов: вычислительного ядра ЦВС и быстродействующего ЦАП.

Вторая схема является развитием первой схемы, вычислительное ядро цифрового вычислительного синтезатора в ней выполнено на основе ПЛИС, а выходной сигнал синтезируется также быстродействующим ЦАП в специальных режимах работы, повышающих эффективность применения образов основной частоты.

Известна методика моделирования СПМ фазовых шумов ЦВС при использовании образов основной частоты [10]. Однако она не учитывает новых режимов работы быстродействующих ЦАП. Требуется провести исследования влияния специальных режимов работы быстродействующих ЦАП на шумовые характеристики формирователей высокочастотных сигналов.

Специальные режимы работы быстродействующих ЦАП

Рассмотрим основные режимы работы быстродействующего цифроаналогового преобразователя.

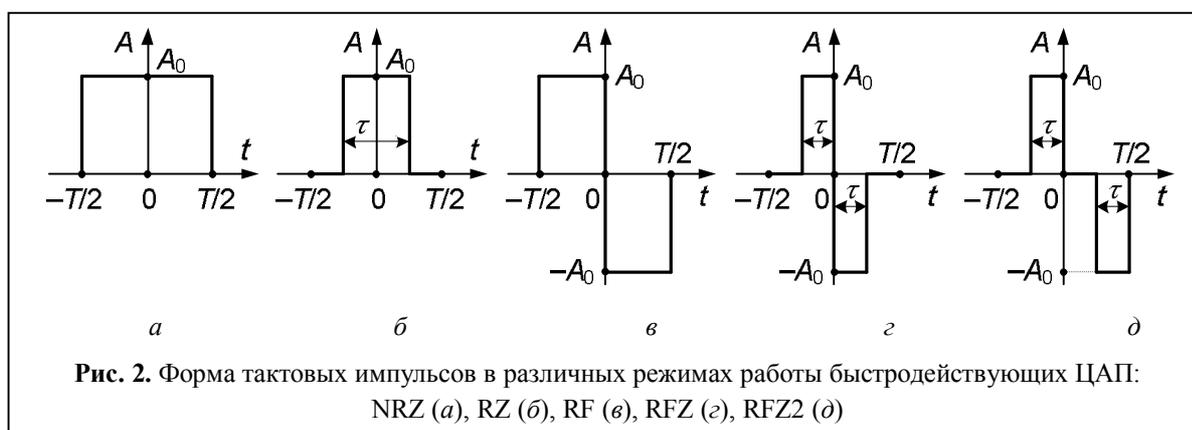
1. Нормальный режим работы, или non-return-to-zero (NRZ). Форма тактового импуль-

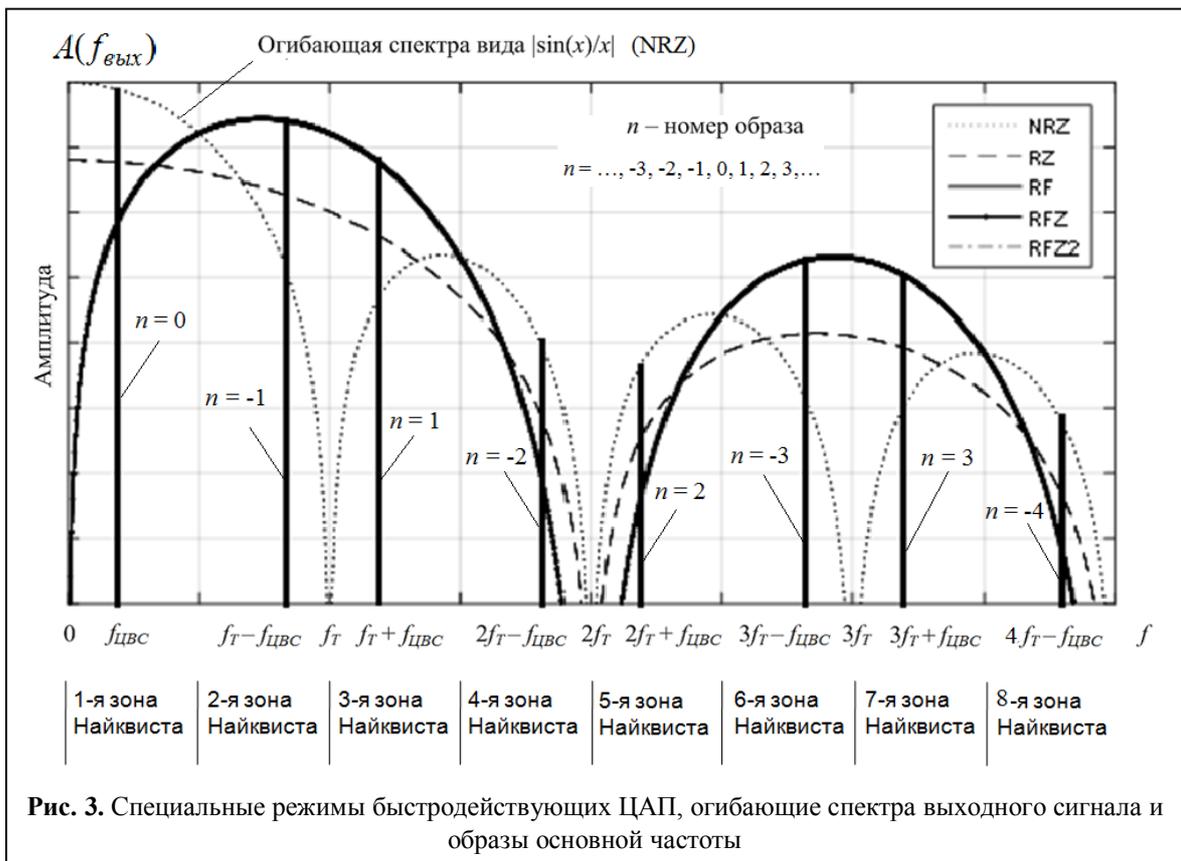
са ЦАП в режиме NRZ показана на рис. 2, а, частотная характеристика – на рис. 3. Максимум частотной характеристики приходится на первую зону Найквиста. При использовании образов, расположенных в других зонах Найквиста, в данном режиме огибающая частотной характеристики вида $\sin(x)/x$ вызывает уменьшение амплитуды образов.

2. Режим работы ЦАП, в котором применяется уменьшение длительности τ тактовых импульсов (рис. 2, б) так, что выходной сигнал оказывается как бы «вырезан» из сигнала режима NRZ в интервалы времени $-\tau/2 < t < \tau/2$. получил название режим с возвратом к нулю (return-to-zero (RZ) mode). [1–3]. Преимущество режима RZ заключается в том, увеличивается амплитуда гармоники минус 1-го образа во второй зоне Найквиста.

3. Принципиально другим режимом работы, применяемым в некоторых быстродействующих ЦАП, является режим радиочастоты (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. 2, в). Режим радиочастоты RF является оптимальным для работы на высокой частоте выходного сигнала, во второй и третьей зонах Найквиста.

4. Путём уменьшения длительности разнополярных импульсов режима RF относительно момента $t = 0$ так, как показано на рис. 2, г, разработчики реализуют ещё один режим ра-





боты быстродействующих ЦАП, известный как RFZ режим радиочастоты с возвратом к нулю (radio frequency return-to-zero mode) [1–2].

5. Ещё один режим работы ЦАП, условно названный RFZ2 (режим радиочастоты с возвратом к нулю 2) [11]. В нём 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. 2, д).

Частотные характеристики описанных быстродействующих ЦАП для различных режимов работы и гармоник образов основной частоты приведены на рис. 3.

Математическая модель СПМ фазовых шумов формирователя сигналов на основе быстродействующего ЦАП в специальных режимах работы

Составим математическую модель формирователя сигналов на основе быстродействующего

ЦАП. Воспользуемся математической моделью СПМ фазовых шумов на выходе ЦВС, использующего образы основной частоты [9] и преобразуем её к виду

$$S_{выхЦВС}(F) = (S_{ГОЧ}(F) \cdot n_1^2 + S_{УЧ1}(F)) \times (n + K_{ЦВС})^2 + S_{ЦВС}(F) \cdot Z_{ЦАП}^2, \quad (2)$$

где $Z_{ЦАП}$ – коэффициент передачи фазовых шумов для разных режимов работы быстродействующих ЦАП.

С учётом выходного умножителя частоты математическая модель спектральной плотности мощности фазовых шумов представляется в виде выражения:

$$S_{\phi}(F) = ((S_{ГОЧ}(F) \cdot n_1^2 + S_{УЧ1}(F))(n + K_{ЦВС})^2 + S_{ЦВС}(F) \cdot Z_{ЦАП}^2) \cdot n_2^2 + S_{УЧ2}(F). \quad (3)$$

Для построения математических шумовых характеристик специальных режимов необходимо вывести коэффициенты передачи фазовых шумов специальных режимов ЦАП.

В статье [12] были получены огибающие спектра для всех рассматриваемых специальных режимов. Огибающая спектра $\dot{S}_{RZ}(\omega)$ в режиме RZ выражается через $\dot{S}_{NRZ}(\omega)$

$$\begin{aligned} \dot{S}_{RZ}(\omega) &= \frac{T}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_{q0}(\tilde{\omega}) \cdot \dot{S}_{NRZ}(\omega - \tilde{\omega}) d\tilde{\omega} = \\ &= \frac{A_0}{q} \cdot \frac{\sin(\omega T/2q)}{(\omega T/2q)} = \frac{A_0}{q} \cdot \text{sin c}\left(\frac{\omega T}{2q}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

где $\dot{S}_{q0}(\tilde{\omega}) = \frac{1}{q} \cdot \frac{\sin(\omega T/2q)}{(\omega T/2q)}$; $q = T/\tau$ – скважность тактовых импульсов.

Получим коэффициенты, определяющие форму огибающей спектра выходного сигнала ЦАП, то есть зависимости амплитуды от частоты для всех исследуемых режимов работы. Для режима RZ перейдем к виду:

$$K_{RZ}(f, q) = \frac{A_0}{q} \cdot \frac{\sin(\pi f / f_T q)}{(\pi f / f_T q)}, \quad (5)$$

поскольку $f = f_T |n + K_{ЦВС}|$, тогда $f / f_T = |n + K_{ЦВС}|$ и соответственно

$$K_{RZ}(K_{ЦВС}, q, n) = \frac{A_0}{q} \cdot \frac{\text{sin}\left(\pi \frac{|n + K_{ЦВС}|}{q}\right)}{\pi \frac{|n + K_{ЦВС}|}{q}} \quad (6)$$

Данное выражение представляет собой коэффициент передачи амплитуды сигнала от скважности, номера образа. Для описания СПМ фазовых шумов используется квадрат коэффициента передачи фазовых шумов, т.е. обратная величина квадрата коэффициента передачи амплитуды. Поэтому результирующий коэффициент передачи фазовых шумов ЦАП определяется формулой:

$$Z_{RZ}(K_{ЦВС}, q, n) = \frac{1}{K_{RZ}} = \frac{\pi |n + K_{ЦВС}|}{\text{sin}\left(\frac{\pi |n + K_{ЦВС}|}{q}\right)}, \quad (7)$$

аналогично выводим коэффициенты передачи фазовых шумов для остальных режимов работы ЦАП. Для RF режима:

$$Z_{RF}(K_{ЦВС}, q, n) = \frac{\pi |n + K_{ЦВС}|}{2 \left(\text{sin}\left(\frac{\pi |n + K_{ЦВС}|}{2}\right) \right)^2} \quad (8)$$

Коэффициент передачи фазовых шумов для режима RFZ имеет вид:

$$Z_{RFZ}(K_{ЦВС}, q, n) = \frac{\pi |n + K_{ЦВС}|}{2 \left(\text{sin}\left(\frac{\pi |n + K_{ЦВС}|}{q}\right) \right)^2} \quad (9)$$

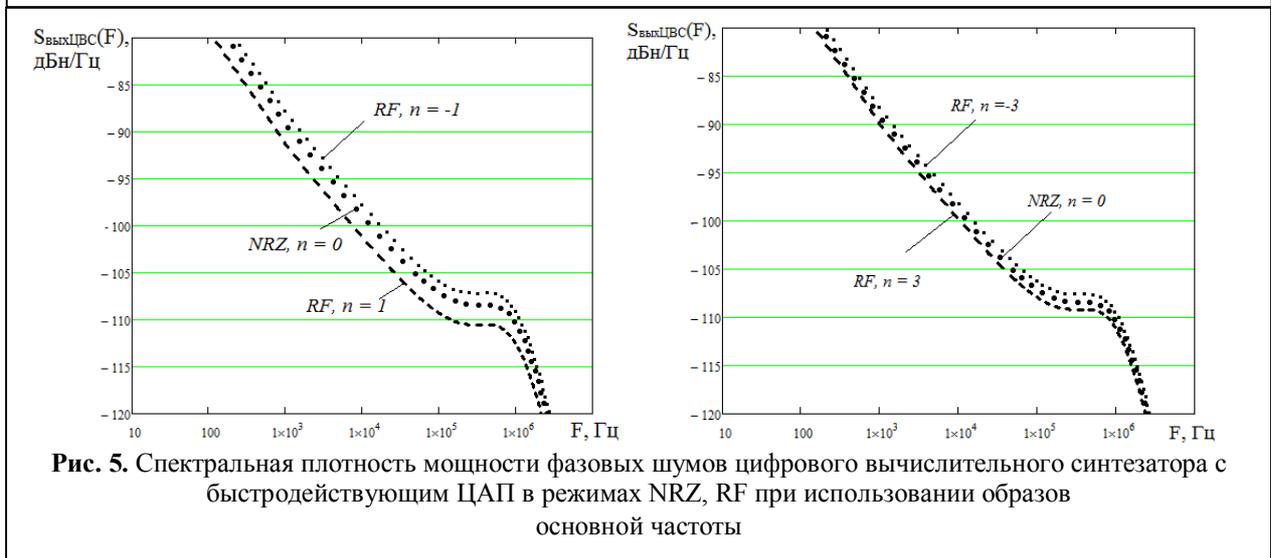
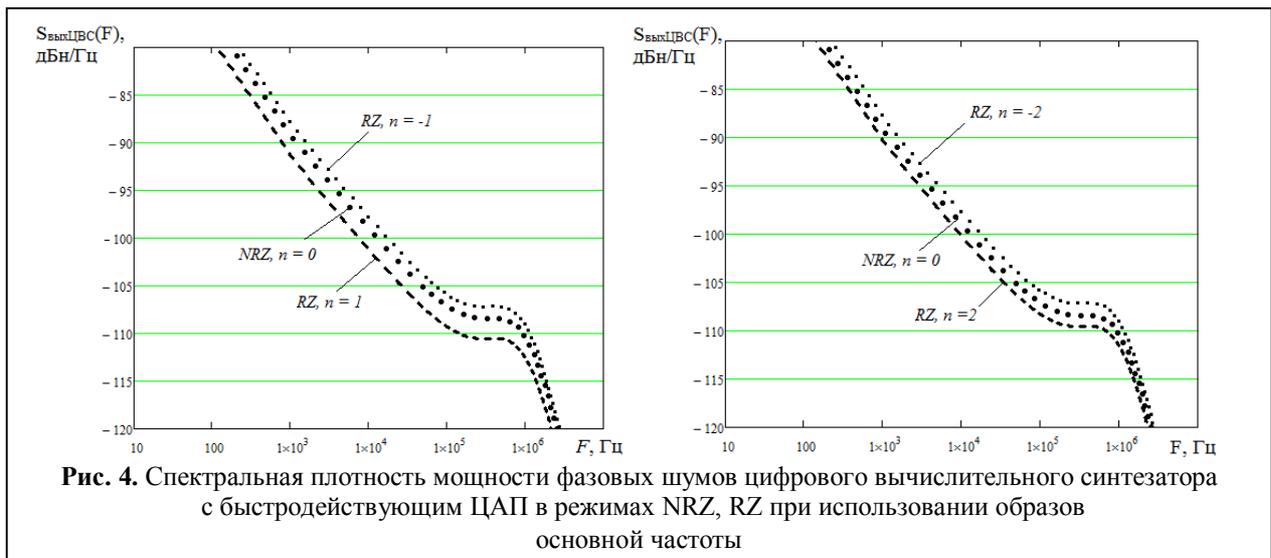
В режиме RFZ2 коэффициент передачи фазовых шумов равен:

$$\begin{aligned} Z_{RFZ2}(K_{ЦВС}, q, n) &= \\ &= \frac{\pi |n + K_{ЦВС}|}{2 \text{sin}\left(\frac{\pi |n + K_{ЦВС}|}{q}\right) \cdot \text{sin}\left(\frac{\pi |n + K_{ЦВС}|}{2}\right)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Полученные коэффициенты передачи фазовых шумов быстродействующих ЦАП позволят нам оценить шумовые характеристики ЦВС на основе быстродействующего ЦАП работающего в специальных режимах.

Воспользуемся формулой (2) и выражениями для коэффициентов передачи фазовых шумов ЦАП в различных режимах для расчёта СПМ фазовых шумов формирователя сигналов.

Рассмотрим результаты математического моделирования спектральной плотности мощности фазовых шумов формирователя сигналов (рис. 4, 5), выполненного для ЦВС AD9910 с учётом замены встроенного цифроаналогового преобразователя на быстродействующий. Спектральная плотность мощности фазовых шумов цифрового вычислительного синтезатора с использованием быстродействующего ЦАП была приведена к одной частоте, соответствующей третьему отрицательному образу ($n = -3$). Влияние множителя тактовой частоты на системе ФАПЧ, встроенного в ЦВС AD9910, было учтено.



Заключение

Представленные на рис. 4, 5 зависимости позволяют сделать вывод о том, что СПМ фазовых шумов цифрового синтезатора, построенного на быстродействующем цифро-аналоговом преобразователе, изменяется в соответствии с частотной характеристикой ЦАП в различных режимах работы. Наилучшим режимом работы ЦАП для образов $n = -1, 1, -3, 3$ является режим радиочастоты RF. В этом режиме достигается наибольший выигрыш в уровне фазовых шумов для 1-ого образа, равный 2–2,5 дБ.

Использование режимов RFZ и RFZ2, в которых длительность восстановленного импульса с положительной и отрицательной полярностью на выходе ЦАП может изменяться в пределах пери-

ода тактовой частоты, также позволяет уменьшить уровень фазовых шумов. Однако необходимы дополнительные исследования для определения оптимальной длительности восстанавливаемых импульсов, при которой возможно максимальное снижение уровня фазовых шумов.

Использование специальных режимов работы быстродействующих ЦАП и образов основной частоты позволяет сформировать высокочастотные сигналы без ухудшения шумовых характеристик и уменьшает количество требуемых выходных умножителей частоты в формирователях высокочастотных сигналов.

Литература

1. High-Speed DACs [Электронный ресурс]: сайт компании Maxim Integrated, 2017. Режим до-

ступа: <https://para.maximintegrated.com/en/results.mvp?fam=hsdacs&tree=master> (дата доступа 4.11.2019).

2. High Speed DAC [Электронный ресурс]: сайт компании Analog Devices, Inc., 2017. Режим доступа: <http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/high-speed-da-converters.html> (дата доступа 4.11.2019).

3. *Ajay K., Geir O.* High-Speed DACs ease transmitter designs [Электронный ресурс]: Microwave & RF, 2010. Режим доступа: <https://www.mwrf.com/components/high-speed-dacs-ease-transmitter-designs> (дата доступа 4.11.2019).

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 // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013.

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.

Поступила 5 ноября 2019 г.

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 возбудителя передатчика с использованием образов основной частоты // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2011. № 13. С. 44–47.

9. *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.

10. *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.

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

English

MATHEMATICAL MODELING OF NOISE PROPERTIES FOR HIGH-FREQUENCY SIGNAL GENERATORS BASED ON HIGH-SPEED DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTERS

Vladimir Viktorovich Romashov – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Radio Engineering Department, Murom Institute (Branch) “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

Andrey Nikolayevich Doctorov – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute (Branch) “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

Kirill Aleksandrovich Yakimenko – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute (Branch) “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

Natalya Aleksandrovna Sochneva – Master's Degree Student, Radio Engineering Department, Murom Institute (Branch) “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

Sergey Yevgenevich Materukhin – Master's Degree Student, Radio Engineering Department, Murom Institute (Branch) “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: romashovmurom@mail.ru.

Address: 602254, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Orlovskaya street, 23.

Abstract: The development of current digital systems, growth of performance and operating clock frequency, as well as developments of specific designs for forming output signal has resulted in making high-speed digital-to-analog converters (DAC). They make the most important part of direct digital synthesizer (DDS) based on which digital radio-frequency signal shapers are developed. The design improvement of digital-to-analog radio frequency converters brought about development of a few new operating modes, optimal for using extraneous high-frequency components of output signal spectrum - fundamental frequency images. Using fundamental frequency images enables to increase output signal frequency of the whole shaper, and applying DAC new operating modes enables here to increase signal-to-noise ratio without using additional devices. Main operating modes used in high-speed DACs for digital forming of broadband radio signals are examined. We can single out the following among them: non-return-to-zero, return-to-zero, radio frequency, radio frequency return-to-zero and its variation as radio frequency return-to-zero 2. Previously developed methods of modeling power spectral density (PSD) of DDS phase noise when using fundamental frequency images ignore high-speed DACs new operating modes. Mathematical model of power spectral density for phase noise of signal shaper based on digital computing synthesizer, which comprises a high-speed digital-to-analog converter in special operating modes is proposed. Research findings of special operating modes' impact of high-speed DACs on noise properties of high-frequency signal shapers are given. Transmission ratios of noise properties of high-speed digital-to-analog converters for various operating modes are derived and dependences of these ratios on duty cycle and image number are investigated. The research of developed mathematical model for power spectral density of signal shapers' phase noise with high-speed digital-to-analog converters showed that using special operating modes enhances application efficiency of fundamental frequency images in direct digital synthesizers for forming radio signals and it improves signal shaper's noise properties.

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

References

1. High-Speed DACs [Electronic source]: Maxim Integrated, 2017. URL: <https://para.maximintegrated.com/en/results.mvp?fam=hsdacs&tree=master> (access date 4.11.2019).
2. 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 4.11.2019).
3. Ajay K., Geir O. High-Speed DACs ease transmitter designs [Electronic source]: Microwave & RF, 2010. Режим доступа: <https://www.mwrf.com/components/high-speed-dacs-ease-transmitter-designs> (дата доступа 4.11.2019).
4. Romashov V.V., Romashova L.V. Modeling of noise characteristics of integrated direct digital synthesizers. Radio and telecommunication systems. 2011. No. 4. Pp. 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. 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013.
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. Romashov V. V., Khramov K. K. The generator of a grid of reference frequencies of the exciter of the transmitter with use of images of the basic frequency. Methods and devices of information transmission and processing. 2011. No. 13. Pp. 44–47.
9. Romashov V.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. Frequency planning of signal generators of radio systems based on digital digital synthesizers. Radio and telecommunication systems. 2012, No. 4. Pp. 10–15.
10. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. Model of spectral power density of phase noise of direct digital synthesizers on images of the main frequency. Radio industry. 2012. No. 2. Pp. 38–48.
11. Khramov K.K., Romashov V.V. Mathematical modeling of operational modes of high-speed DACs. Information technology and nanotechnology. Proceedings of the ITNT-2018. Samara National Research University named after S.P. Korolev. 2018. Pp. 1403–1411.