

Формирование и усиление сигналов

УДК 621.396.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Ромашов Владимир Викторович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

E-mail: romashovmurom@mail.ru

Ромашова Любовь Владимировна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

E-mail: romashovamurov@mail.ru

Грошков Игорь Дмитриевич

инженер-конструктор 1 категории АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов»².

Сочнева Наталья Александровна

аспирант кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»³.

E-mail: sochnewa.natalya@yandex.ru

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

²Адрес: 602267, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, Карачаровское шоссе, 2

³Адрес: 600000, Российская Федерация, г. Владимир, ул. Горького, д. 87.

Аннотация: Разработана методика получения математической модели спектральной плотности мощности фазовых шумов в одной боковой полосе цифро-аналоговых преобразователей. Разработана уточненная методика расчета коэффициентов аппроксимации СПМ фазовых шумов в одной боковой полосе частот ЦАП. Полученные в результате моделирования значения шумовые характеристики ЦАП соответствуют экспериментальным.

Ключевые слова: спектральная плотность мощности, фазовые шумы, цифровой вычислительный синтезатор, цифро-аналоговые преобразователи, коэффициенты аппроксимации.

Цифро-аналоговые преобразователи частоты (ЦАП) в последнее время широко используются в радиотехнических системах для формирования высокочастотных радиосигналов благодаря своим достоинствам: возможностью формировать радиосигнал сразу на высокой частоте с требуемыми видами модуляции, высокой точностью синтезируемой частоты, цифровым управлением частотой и фазой выходного сигнала, очень высоким разрешением по частоте и фазе, высокой скоростью перестройки по частоте. Цифро-аналоговые преобразователи являются составной частью цифровых вычисли-

тельных синтезаторов (ЦВС), которые используются для создания опорных сигналов в радиосистемах.

Важной характеристикой, определяющей качество формируемых радиосигналов, является спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов в одной боковой полосе, характеризующаяся отношением мощности шумов на частоте F одной боковой полосы в полосе частот 1 Гц к мощности сигнала. Для теоретического анализа шумовых характеристик радиоустройств используют модели СПМ фазовых шумов на основе степенных функций

[1–3]. Их применение существенно упрощает проектирование формирователей сигналов, позволяя обойтись без сложных экспериментальных исследований. Для цифровых вычислительных синтезаторов подобные модели предложены и рассмотрены в [4, 5]. Так как шумовые характеристики ЦВС в основном определяются шумами ЦАП, то модели СПМ фазовых шумов в одной боковой полосе для ЦАП будут подобны.

Методика получения таких моделей шумовых характеристик ЦВС на основе достаточного количества имеющихся экспериментальных шумовых характеристик данного ЦВС для различных выходных и тактовых частот рассмотрена в [6]. Однако часто в справочных данных ЦВС и ЦАП приводится лишь несколько значений СПМ для нескольких частот отстроек.

Целью работы является разработка методики получения математической модели спектральной плотности мощности фазовых шумов в одной боковой полосе цифро-аналоговых преобразователей на основе недостаточности имеющихся данных.

Запишем математическую модель СПМ фазовых шумов в одной боковой полосе ЦАП на основе модели для ЦВС [4]

$$S_{\text{ЦАП}}(F) = K_{\text{ЦАП}}^2 \left(\frac{10^{k_2}}{F^2} + \frac{10^{k_1}}{F} + 10^{k_4} \right) + 10^{k_3} + S_{\text{кв}}, \quad (1)$$

где коэффициенты k_1, k_2, k_3, k_4 определяют уровень СПМ $1/F^2$ шума, $1/F$ шума, естественной шумовой составляющей входных цепей и естественной шумовой составляющей сопротивления нагрузки, соответственно;

F — отстройка от несущей частоты; $K_{\text{ЦАП}} = f_{\text{out}}/f_T$ — коэффициент передачи ЦАП; f_{out} и f_T — выходная и тактовая частоты ЦАП; $S_{\text{кв}}$ — шумы квантования:

$$S_{\text{кв}} = 2^{-2N-0,59} \left(\frac{f_{\text{out}}}{f_T^2} \right) \left(\sin(\pi K_{\text{ЦАП}}) / (\pi K_{\text{ЦАП}}) \right)^{-2};$$

N — количество разрядов ЦАП.

В [6] предложен алгоритм определения коэффициентов СПМ фазовых шумов k_i по экспериментальным шумовым характеристикам, приводимым в данных интегральных ЦВС.

Для ряда ЦАП приводится лишь несколько значений уровня СПМ фазовых шумов. Например, для микросхемы LTC2000A имеются данные для тактовой частоты 2,7 ГГц, выходной частоте 65 МГц при отстройке 10 кГц и 1 МГц. Кроме того, ещё приводится уровень спектральной плотности тепловых шумов при существенной отстройке от несущей больше 10 МГц для нескольких выходных частот. Пример таких данных для 16-ти разрядного ЦАП LTC2000A приведён в таблице 1. Аналогичные данные для ЦАП LTC2000 приведены в таблице 2 [7]. У этой микросхемы тактовая частота несколько ниже, однако значения СПМ фазовых шумов на 3...9 дБ/Гц меньше.

Как видно из выражения (1), спектральная плотность мощности фазовых шумов в одной боковой полосе определяется несколькими шумовыми составляющими. Наибольший вклад вносят фликкер-шумы $1/F$, которым соответствует линейный участок шумовой характеристики в диапазоне частот 100–10000 Гц с наклоном 10 дБ/дек, когда все остальные со-

Таблица 1. Параметры цифро-аналогового преобразователя LTC2000A

1	Шумовая спектральная плотность $f_T = 2,7$ ГГц; $N = 16$	$f_{\text{out}} = 100$ МГц $f_{\text{out}} = 350$ МГц $f_{\text{out}} = 550$ МГц $f_{\text{outmax}} = 950$ МГц	-164 -158 -155 -153	дБн/Гц дБн/Гц дБн/Гц дБн/Гц
2	Фазовый шум $f_T = 2,7$ ГГц; $f_{\text{out}} = 65$ МГц;	Отстройки от несущей $F_1 = 10$ кГц $F_2 = 1$ МГц	-141 -156	дБн/Гц дБн/Гц

Таблица 2. Параметры цифро-аналогового преобразователя LTC2000

1	Шумовая спектральная плотность $f_T = 2,7$ ГГц; $N = 16$	$f_{out} = 100$ МГц	-166	дБн/Гц
		$f_{out} = 350$ МГц	-161	дБн/Гц
		$f_{out} = 550$ МГц	-158	дБн/Гц
		$f_{outmax} = 950$ МГц	-156	дБн/Гц
2	Фазовый шум $f_T = 2,5$ ГГц; $f_{out} = 65$ МГц;	Отстройки от несущей		
		$F_1 = 10$ кГц $F_2 = 1$ МГц	-147 -165	дБн/Гц дБн/Гц

ставляющие существенно меньше. В выражении (1) их уровень определяется коэффициентом k_1 .

Коэффициенты для естественных составляющих определяются для частот отстройки $F \geq 1$ МГц, когда фликкер-шумы практически равны нулю. СПМ естественного фазового шума входных цепей ЦАП определяется коэффициентом k_4 , а СПМ естественного фазового шума, определяемая шумами нагрузки, не зависит от синтезируемой частоты и определяется коэффициентом k_3 . Для наименьшей выходной частоты ЦАП составляющая $10^{k_4} \left(\frac{f_{outmin}}{f_T} \right)^2$

будет меньше составляющей 10^{k_3} .

Шумы квантования зависят от количества разрядов ЦАП N и при $N \geq 10$ существенно меньше других естественных составляющих шумов. Поэтому ими можно пренебречь и в (1) не учитывать.

Величина k_2 определяет уровень белого частотного шума $1/F^2$, который определяется для минимальной частоты отстройки $F = 10$ Гц и имеет небольшое влияние только на малых частотах отстройки для некоторых типов ЦАП.

Поэтому для построения математической модели шумовых характеристик ЦАП при низкой выходной частоте достаточно определить коэффициенты k_1 , k_3 и k_4 . Для этого воспользуемся преобразованным выражением для k_1 из [6]

$$k_1 = \lg \left(\frac{10^{-S_{изм1}(F_1, f_{outmin})/10} F_1}{(K_{ЦАП min})^2} \right). \quad (2)$$

Здесь $S_{изм1}(F_1, f_{outmin})$ — значение СПМ фазового шума в дБ/Гц для наименьшей выходной частоты f_{outmin} ЦАП при частоте отстройки F_1 (наименьший $K_{ЦАП min} = f_{outmin}/f_T$). При подстановке данных из таблицы 1 для частоты отстройки $F_1 = 10$ кГц и $S_{изм1}(F_1, f_{outmin}) = -141$ дБн/Гц получаем $k_1 = -6,88$.

Коэффициенты для естественных составляющих определяются для частоты отстройки $F_2 \geq 1$ МГц, когда фликкер-шумы равны нулю, для наименьшей и наибольшей выходных частот ЦАП без учёта шумов квантования

$$k_3 = \lg \left(10^{-S_{изм2}(F_2, f_{outmin})/10} \right),$$

$$k_4 = \lg \left(\frac{10^{-S_{NSD}(F_2, f_{outmax})/10} - 10^{k_3}}{(K_{ЦАП max})^2} \right) \quad (3)$$

Полученные значения коэффициентов $k_3 = -16,4$, $k_4 = -14,43$. Построенные характеристика спектральной плотности мощности фазовых шумов в одной боковой полосе частот ЦАП и ее составляющие приведены на рис. 1. Видно, что для малой выходной частоты 65 МГц естественная составляющая, определяемая коэффициентом k_4 , существенно меньше всех остальных. Однако с ростом выходной частоты её значение возрастает.

Результаты моделирования шумовых характеристик ЦАП LTC2000A при различных выходных частотах приведены на рис. 2. Видно, что с увеличением выходной частоты уровень СПМ фазовых шумов увеличивается пропорционально квадрату изменения выходной ча-

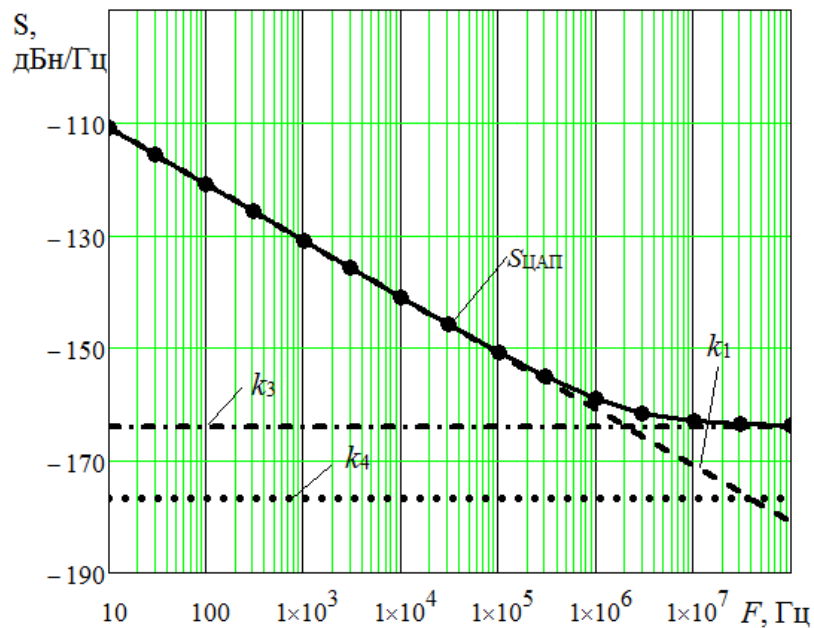


Рис. 1. Спектральная плотность мощности фазовых шумов в одной боковой полосе частот ЦАП LTC2000A и ее составляющие для выходной частоты $f_{out} = 65$ МГц и при тактовой частоте $f_T = 2,7$ ГГц

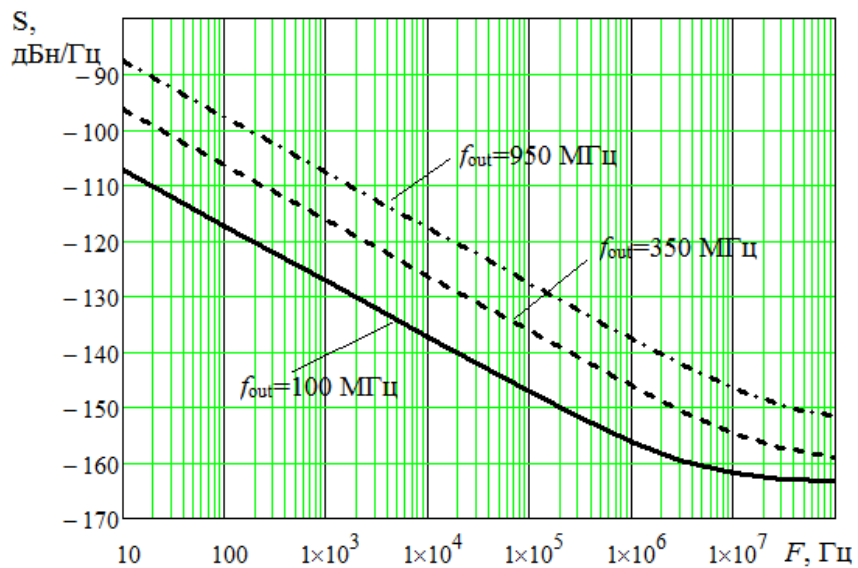


Рис. 2. Спектральная плотность мощности фазовых шумов в одной боковой полосе частот ЦАП LTC2000A для выходных частот $f_{out} = 65$ МГц, 350 МГц и 950 МГц при тактовой частоте $f_T = 2,7$ ГГц

стоты в соответствии с (1), и лишь при отстройке более 1 МГц большее влияние оказывает естественная составляющая 10^{k_3} , не зависящая от частоты. Значения СПМ фазовых шумов для большой отстройки (аддитивные шумы) для трёх частот соответствуют приводимым в справочных данных микросхем ЦАП [7].

Для ЦАП LTC2000 рассчитанные коэффициенты модели равны $k_1 = -7,54$, $k_3 = -16,5$, $k_4 = -14,5$, а полученные шумовые характеристики в сравнении с LTC2000A приведены на рис. 3.

Видно, что для ЦАП LTC2000 уровень фликкер-шумов на 6 дБн/Гц ниже даже при меньшей тактовой частоте. Естественные шу-

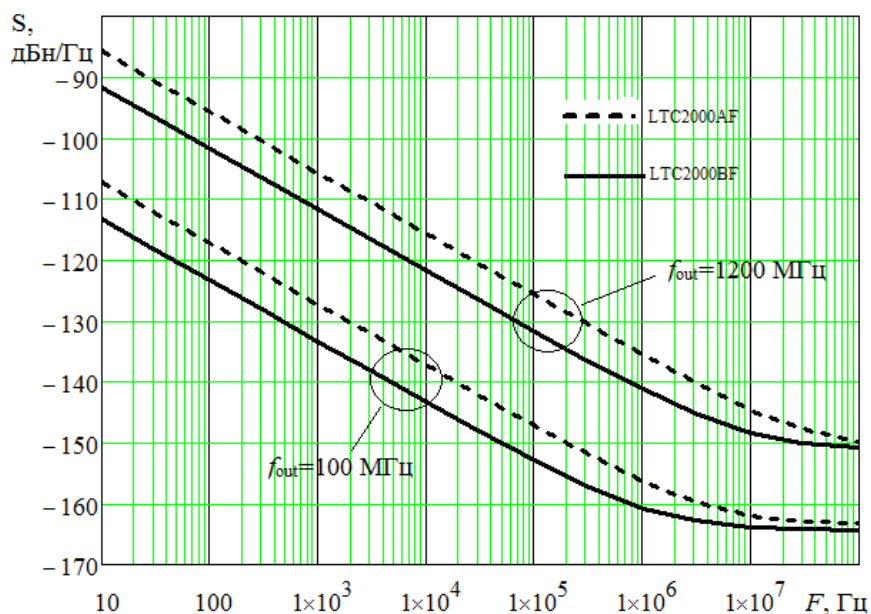


Рис. 3. Спектральная плотность мощности фазовых шумов в одной боковой полосе частот ЦАП LTC2000A и LTC2000 для выходных частот $f_{out}=100$ МГц и 1200 МГц

мы обеих микросхем сравнимы и соответствуют данным таблиц 1 и 2.

На рис. 4 приведено сравнение экспериментальных шумовых характеристик ЦАП [7] с построенными по полученным моделям. Видно достаточно хорошее их совпадение, пригодное

для практического использования при проектировании формирователей высокочастотных сигналов без создания экспериментального образца.

Таким образом, предложенная в [5] математическая модель спектральной плотности

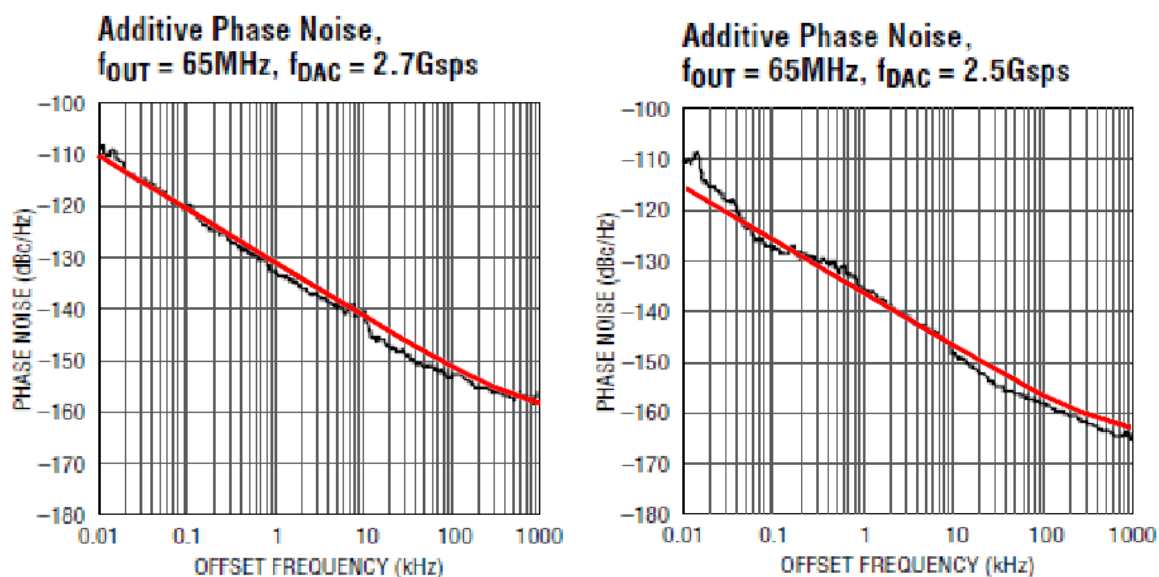


Рис. 4. Экспериментальные и полученные в результате моделирования спектральные плотности мощности фазовых шумов в одной боковой полосе частот ЦАП LTC2000A и ЦАП LTC2000 для выходных частот $f_{out} = 65$ МГц при тактовых частотах $f_T = 2,7$ ГГц и 2,5 ГГц

мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов и методика расчёта коэффициентов модели [6] с достаточной степенью точности подходит для теоретического исследования шумовых характеристик цифро-аналоговых преобразователей.

Литература

1. *Рыжков А.В., Попов В.Н.* Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.
2. *Kroupa V.F.* Phase Lock Loops and Frequency Synthesis. New York: John Wiley & Sons, 2003. 320 p.
3. *Kroupa V.F.* Direct Digital Frequency Synthesizers. New York: John Wiley & Sons, 1998. 396 p.
4. *Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K.* Research of Phase Noise of Direct Digital Synthesizers // Proc. of the 2011 IEEE Int. Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2011, Krasnoyarsk, Russia, September 15–16, 2011. Pp. 168–171.
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 in Proc. of the 2013 Int. Siberian Conf. on Control and Communications, SIBCON-2013. Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013.
6. *Ромашов В.В., Ромашова Л.В.* Методика расчета коэффициентов аппроксимации спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012, №1. С. 23–26.
7. High Speed DAC [Электронный ресурс]: сайт компании Analog Devices, Inc., 2021. URL: <http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/high-speed-da-converters.html> (Дата доступа 6.04.2021).

Поступила 6 апреля 2021 г.

English

MATHEMATICAL MODELS OF NOISE PROPERTIES OF DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTERS

Vladimir Viktorovich Romashov — Grand Dr. in Engineering, Professor, Head of Radio Engineering Department, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”¹.
E-mail: romashovmurom@mail.ru

Lyubov Vladimirovna Romashova — PhD, Associate Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”¹.
E-mail: romashovamurom@mail.ru

Igor Dmitrievich Groshkov — 1st Category Design Engineer, JSC “Murom Plant of Radio Measuring Instruments” (JSC “MP RMI”)².

Natalya Alexandrovna Sochneva — postgraduate student, “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”³.
E-mail: sochnewa.natalya@yandex.ru

¹*Address:* 602264, Russian Federation, Vladimir Region, Murom, Orlovskaya street, 23.

²*Address:* 602267, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Karacharovskoe Highway, 2.

³*Address:* 602264, Russian Federation, Vladimir, Gorky street. 87.

Abstract: Digital-to-analog frequency converters (DACs) have lately been widely used in radio engineering systems for generating high-frequency radio signals. They make an integral part of direct digital synthesizers (DDS), which are used to produce reference signals in radio systems. The important property defining the quality of generated radio signals is power spectrum density (PSD) of phase noise in single sideband, evaluated by ratio of noise power on one sideband frequency F within 1Hz bandwidth to signal power. Phase noise PSD models based on power functions are used for theoretical analysis of noise properties for radio devices. The methods of deriving such models for DDS noise properties based on sufficient number of available DDS experimental noise performance for various output and clock frequencies were obtained earlier. This paper presents methods to obtain a mathematical model for power spectrum density of phase noise in single sideband of digital-to-analog converters based on insufficiency of available data, since there are often only a few values of power spec-

trum density of phase noise for several time-out frequencies in DAC reference data. A re-defined calculation procedure for approximation coefficients of phase noise PSD in DAC single sideband is proposed. Simulation data comparison of DAC noise properties as per derived models on various output frequencies with experimental characteristics testified their good agreement.

Keywords: power spectral density, phase noise, direct digital synthesizer, digital-to-analog converters, approximation coefficients.

References

1. Ryzhkov A.V., Popov V.N. Frequency synthesizers in radio communication technology. Moscow: Radio i Svyaz', 1991. 264 p.
2. Kroupa V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis. New York: John Wiley & Sons, 2003. 320 p.
3. Kroupa V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. New York: John Wiley & Sons, 1998. 396 p.
4. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K. Research of Phase Noise of Direct Digital Synthesizers. Proc. of the 2011 IEEE Int. Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2011, Krasnoyarsk, Russia, September 15–16, 2011. Pp. 168–171.
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 in Proc. of the 2013 Int. Siberian Conf. on Control and Communications, SIBCON-2013. Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013.
6. Romashov V.V., Romashova L.V. Methodology for calculating the coefficients of approximation of the spectral power density of phase noise of direct digital synthesizers. Radio and Telecommunications Systems. 2012. No. 1. Pp. 23–26.
7. High Speed DAC [Electronic source]: сайт компании Analog Devices, Inc., 2021. URL: <http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/high-speed-da-converters.html> (Access date 6.04.2021).