

Математические модели шумовых характеристик быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей формирователей радиолокационных сигналов

В.В. Ромашов¹, Л.В. Ромашова¹, А.Н. Докторов¹, К.А. Якименко¹, Н.А. Сочнева¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых", E-mail: romashovmurom@mail.ru, doctorov_a_n@mail.ru

Получена математическая модель спектральной плотности мощности фазовых шумов быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей в одной боковой полосе частот отстройки. Рассчитанные с использованием разработанной математической модели СПМ фазовых шумов быстродействующих цифроаналоговых преобразователей фирмы Analog Devices в режиме эффективности в основной полосе частот NRZ показали небольшую погрешность по сравнению с экспериментальными характеристиками. Показано, что в режиме передискретизации $2 \times NRZ$ уровень фазовых шумов быстродействующего ЦАП на 7-8 дБн/Гц ниже, чем в основном режиме работы NRZ.

Ключевые слова: спектральная плотность мощности, фазовые шумы, прямой цифровой синтез, быстродействующий цифро-аналоговый преобразователь

Mathematical models of noise characteristics of high-speed digital-to-analog converters of radar signal generators

V.V. Romashov¹, L.V. Romashova¹, A.N. Doktorov¹, K.A. Yakimenko¹, N.A. Sochneva¹

¹ Murom Institute (branch) of the Vladimir State University, 23, Orlovskaya street, Murom, the Russian Federation

A mathematical model of the power spectral density of phase noise of high-speed digital-to-analog converters in one side frequency band of tuning is obtained. Calculated using the developed mathematical model of the power spectral density of phase noise of high-speed digital-to-analog converters from Analog Devices in the efficiency mode in the NRZ baseband showed a small error in comparison with the experimental characteristics. It is shown that in the $2 \times NRZ$ oversampling mode, the phase noise level of the high-speed DAC is 7-8 dBc/Hz lower than in the main NRZ operation mode.

Keywords: power spectral density, phase noise, direct digital synthesis, high-speed digital-to-analog converter

Введение

Цифро-аналоговые преобразователи частоты (ЦАП) [1-3] в последнее время широко используются в радиотехнических системах для формирования высокочастотных радиосигналов благодаря своим достоинствам: возможностью формировать радиосигнал сразу на высокой частоте сразу с требуемыми видами модуляции, высокой точности синтезируемой частоты, цифровым управлением частотой и фазой выходного сигнала, очень высоким разрешением по частоте и фазе, высокой скоростью перестройки по частоте [4, 5]. Цифро-аналоговые преобразователи являются составной частью цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС) [6-8], 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, характеризуемая отношением мощности шумов на частоте F одной боковой полосы в полосе частот 1 Гц к мощности сигнала [9].

Для теоретического анализа шумовых характеристик радиоустройств используют модели СПМ фазовых шумов на основе степенных функций [6]. Их применение существенно упрощает проектирование формирователей сигналов и других устройств, позволяя обойтись без сложных экспериментальных исследований. Для цифровых вычислительных синтезаторов подобные модели предложены и рассмотрены в [10,11]. Так как шумовые характеристики ЦВС в основном определяются шумами ЦАП, то за основу модели СПМ фазовых шумов в одиночной боковой полосе ЦАП возьмем модель характеристик ЦВС.

Целью работы является разработка математической модели спектральной плотности мощности фазовых шумов в одной боковой полосе цифро-аналоговых преобразователей в различных режимах работы.

Модель спектральной плотности мощности фазовых шумов в одной боковой полосе цифро-аналоговых преобразователей

Для математической модели спектральной плотности мощности фазовых шумов в одной боковой полосе ЦАП воспользуемся моделью для ЦВС [11], основанной на степенных функциях вида

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

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, $K_{ЦАП} = f_{out}/f_T$ - коэффициент передачи ЦАП, f_{out} и f_T - выходная и тактовая

частоты ЦАП, $S_{кв} = 2^{-2N-0,59} \left(\frac{f_{out}}{f_T} \right)^2$ - шумы квантования ЦАП, N - количество разрядов

ЦАП.

В [12] предложен алгоритм определения коэффициентов СПМ фазовых шумов k_i по экспериментальным шумовым характеристикам интегральных ЦВС.

Коэффициент k_1 определяет уровень фликкер-шумов $1/F$ для линейного участка СПМ фазовых шумов в диапазоне частот 100-10000 Гц, когда все остальные составляющие существенно меньше. Поэтому выражение для него для средней частоты $F = 1000$ Гц записывается в виде:

$$k_1 = \lg \left(\frac{10^{-S_{дБ}(F, f_{out\ min})/10} F}{(K_{ЦАП\ min})^2} \right)_{при\ F=1000\ Гц}, \quad (2)$$

Здесь $S_{дБ}(F, f_{out\ min})$ - значение СПМ фазового шума в дБ/Гц, определяемое для наименьшей выходной частоты $f_{out\ min}$ ЦАП (наименьший $K_{ЦВС\ min} = f_{out\ min}/f_T$), для которой имеются экспериментальные спектральные характеристики.

Величина k_2 определяет уровень белого частотного шума $1/F^2$, который определяется для минимальной частоты отстройки $F = 10$ Гц

$$k_2 = \lg \left(\frac{10^{-S_{дБ}(F, f_{out\ min})/10} F^2}{(K_{ЦАП\ min})^2} - 10^{k_1} F \right)_{при\ F=10\ Гц}, \quad (3)$$

Коэффициенты для естественных шумовых составляющих определяются для частот отстройки $F \geq 1$ МГц, когда фликкер-шумы равны нулю, для наименьшей выходной частоты ЦВС

$$k_3 = \lg \left(10^{-S_{\text{дБ}}(F, f_{\text{out min}})/10} - 2^{-2N-0,59} \frac{f_{\text{out min}}}{f_T^2} \right)_{\text{при } F=10^6 \text{ Гц}}, \quad (4)$$

а коэффициент k_4 определяется для максимальной выходной частоты синтезатора для $K_{\text{ЦАП max}} = f_{\text{out max}} / f_T$

$$k_4 = \lg \left(\frac{10^{-S_{\text{дБ}}(F, f_{\text{out max}})/10} - 10^{k_3}}{(K_{\text{ЦАП max}})^2} - 2^{-2N-0,59} \frac{1}{f_{\text{out max}}} \right)_{\text{при } F=10^6 \text{ Гц}}, \quad (5)$$

Уровень шумов квантования ЦАП определяется количеством разрядов N , при $N \geq 14$ шумы квантования существенно меньше аддитивных шумов и их можно не учитывать.

Для создания модели шумовых характеристик цифро-аналоговых преобразователей используем приведенные рис. 1 экспериментальные шумовые характеристики цифро-аналогового преобразователя AD9164 [1]. Такой ЦАП может работать в различных режимах: нормальный режим работы (non-return-to-zero (NRZ)), 2xNRZ - ЦАП работает с удвоенной тактовой частотой, если новые выборки данных фиксируются в ядре ЦАП как по переднему, так и по заднему фронту, radiofrequency (RF) или mixmode - при его реализации каждый тактовый импульс режима NRZ представляется двумя разнополярными импульсами с длительностью, равной половине периода.

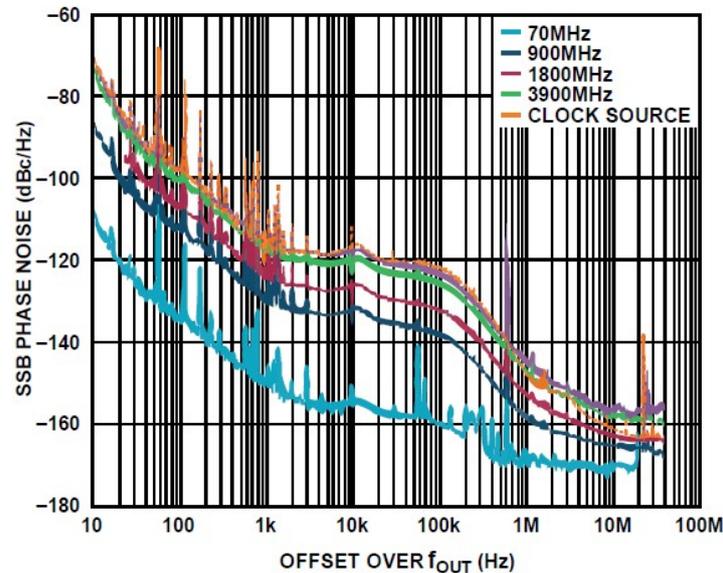


Рис. 1 – Экспериментальные спектральные плотности мощности фазовых шумов в одной боковой полосе ЦАП AD9164 при тактовой частоте $f_T = 6$ ГГц

В данном случае шумовые характеристики микросхемы приведены с учетом шумов тактового генератора

$$S_{\text{ЦАП_ГОЧ}}(F) = S_{\text{ЦАП}}(F) + S_{\text{ГОЧ}}(F)K_{\text{ЦАП}}^2, \quad (6)$$

где $S_{\text{ЦАП}}(F)$, $S_{\text{ГОЧ}}(F)$ - модели шумовых характеристик собственно ЦАП и генератора опорной частоты, $K_{\text{ЦАП}} = f_{\text{out}} / f_T$ - коэффициент передачи ЦАП аналогично

коэффициенту передачи ЦВС в (1). Поэтому для расчета коэффициентов аппроксимации k_i определим шумовые характеристики собственно самого ЦАП $S_{\text{ЦАП}}(F)$ из (6), приведенные для двух выходных частот на рис. 2.

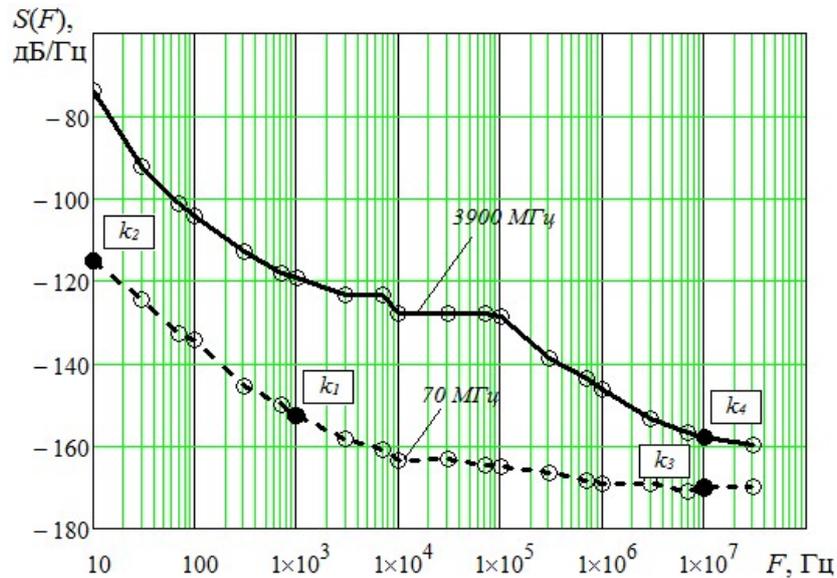


Рис. 2 – Шумовые характеристики ЦАП AD9164

С использованием формул (2) – (4) и рис. 3 определим коэффициенты модели: $k_1 = -8,4$, $k_2 = -5,7$, $k_3 = -17,1$, $k_4 = -15,4$. Результаты моделирования СПМ собственных фазовых шумов ЦАП AD9164 и всей микросхемы с учетом шумов ГОЧ для наименьшей выходной частоты 70 МГц в режиме NRZ представлены на рис. 3.

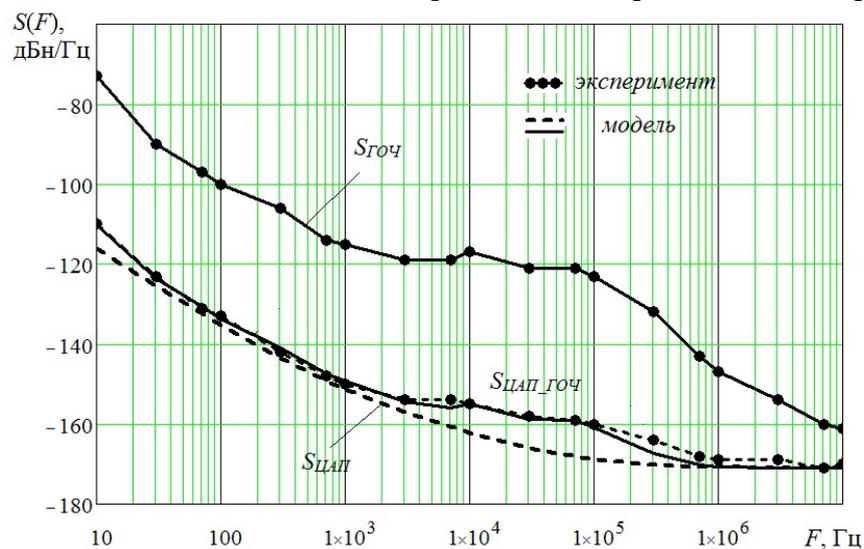


Рис. 3 – Экспериментальные и расчетные шумовые характеристики ЦАП AD9164 на выходной частоте $f_{\text{out}} = 70$ МГц и тактовой частоте $f_T = 6$ ГГц

Как видно, погрешность модели с учетом погрешности оцифровки экспериментальных данных составляет несколько дБн/Гц. Несмотря на большие собственные шумы ГОЧ, результирующие значения СПМ фазовых шумов за счет малого коэффициента передачи $K_{\text{ЦАП}} = f_{\text{out}} / f_T$ для малой выходной частоты в основном определяются шумами самого ЦАП.

Для других частот результаты моделирования, приведенные на рис. 4, также оказались удовлетворительными.

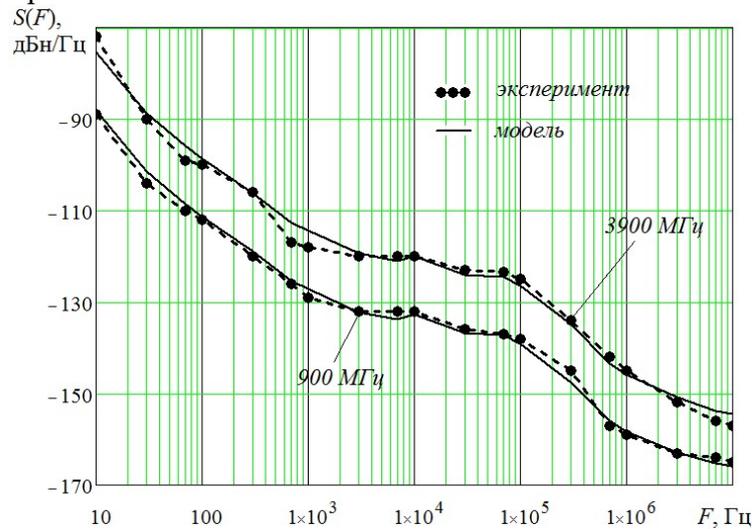


Рис. 4 - Экспериментальные и расчетные шумовые характеристики ЦАП AD9164 в режиме NRZ с учетом шумов ГОЧ на выходных частотах 3900 МГц и 900 МГц при тактовой частоте $f_T = 6$ ГГц

Аналогичные расчеты проведены для ЦАП AD9172. Коэффициенты аппроксимации $k_1 = -7,25$, $k_2 = -4,87$, $k_3 = -15,8$, $k_4 = -13,6$, а сравнение результатов моделирования шумовых характеристик с экспериментальными характеристиками в режиме NRZ приведено на рис. 5. Как видно, наибольшая погрешность наблюдается на частотах отстройки более 300 кГц. Это связано, вероятно, с погрешностью аппроксимации исходных экспериментальных характеристик.

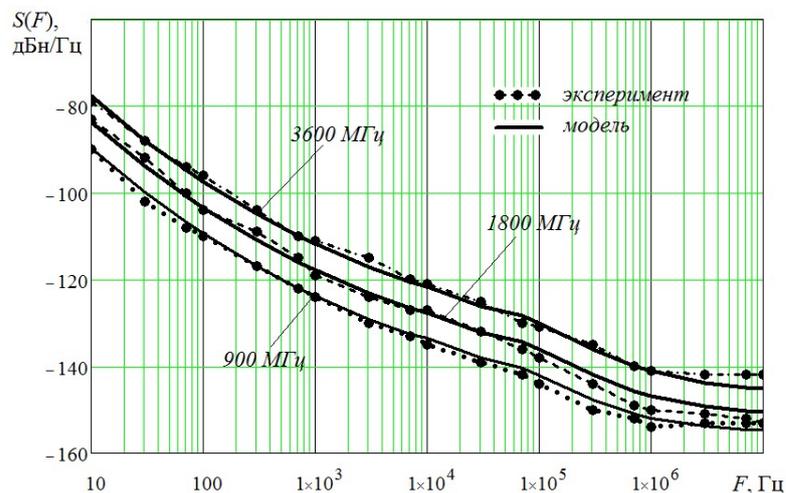


Рис. 5 - Экспериментальные и расчетные шумовые характеристики ЦАП AD9172 в режиме NRZ с учетом шумов ГОЧ на выходных частотах 3600 МГц, 1800 МГц и 900 МГц при тактовой частоте $f_T = 12$ ГГц

Проведем исследование шумовых характеристик ЦАП в режиме 2xNRZ. В этом режиме выборки сигнала делаются по переднему и заднему фронтам импульсов тактового генератора, что эквивалентно удвоению тактовой частоты. Приведенные в данных интегрального ЦАП AD9164 шумовые характеристики для тактовой частоты

$f_T = 4000$ МГц соответствуют этому режиму и показаны на рис.6.

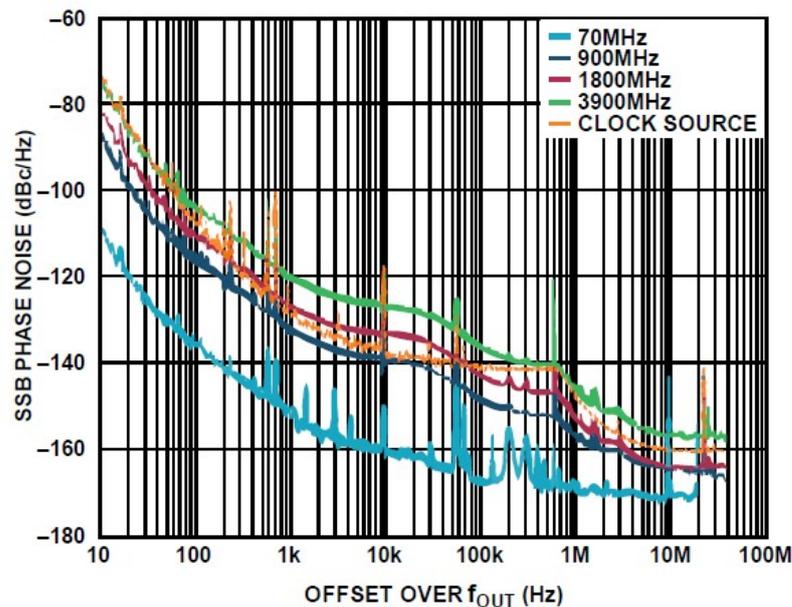


Рис. 6 - Экспериментальные шумовые характеристики AD9164 при тактовой частоте 4000 МГц в режиме 2xNRZ

Рассмотрим, как изменяются шумовые характеристики самого ЦАП при изменении тактовой частоты. Для этого добавим в выражение для математической модели шумовых характеристик (1) коэффициент передачи ЦАП, так как он влияет на характеристику при частотах отстройки более $0,4f_T$

$$S_{\text{ЦАП}}(F) = \left(\frac{f_{\text{out}}}{f_T}\right)^2 \left(\frac{10^{k_2}}{F^2} + \frac{10^{k_1}}{F} + 10^{k_4}\right) + \left(10^{k_3} + S_{\text{КВ}}\right) \left(\frac{\pi f_{\text{out}}/f_T}{\sin(\pi f_{\text{out}}/f_T)}\right)^2, \quad (7)$$

Построенные с использованием модели (7) зависимости для режимов NRZ и 2xNRZ (в формуле подставлена удвоенная тактовая частота) приведены на рис. 7.

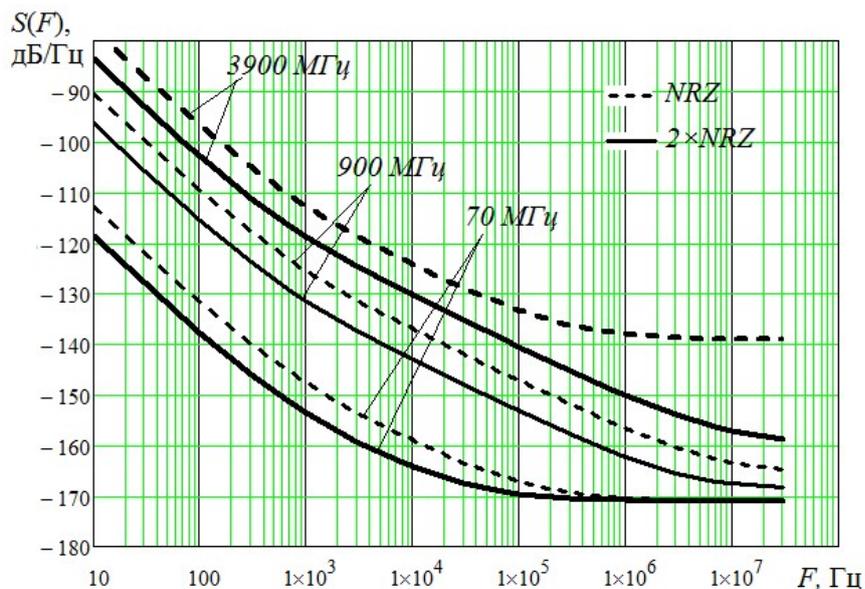


Рис. 7 - Шумовые характеристики ЦАП AD9164 в режимах NRZ и 2xNRZ

Для низкой выходной частоты 70 МГц характеристики для режимов NRZ и 2xNRZ до отстройки 10 кГц отличаются друг от друга на 6 дБн/Гц, при большей отстройке обе зависимости ограничены тепловыми шумами на уровне -171 дБн/Гц. Для частоты 900 МГц зависимости при любых отстройках отличаются на 6 дБн/Гц, а с ростом выходной частоты до 3900 МГц начинает сказываться коэффициент передачи ЦАП и фазовые шумы в режиме NRZ при отстройке выше 100 кГц существенно (на 20 дБн/Гц) возрастают. Этого не происходит в 2xNRZ, так как при удвоенной тактовой частоте влияние коэффициента передачи ЦАП на естественные шумы несущественно.

При формировании высокочастотных сигналов большое влияние оказывают фазовые шумы опорного генератора. С учетом шумов ГОЧ в соответствии с (6) полученные шумовые характеристики AD9164 приведены на рис. 8.

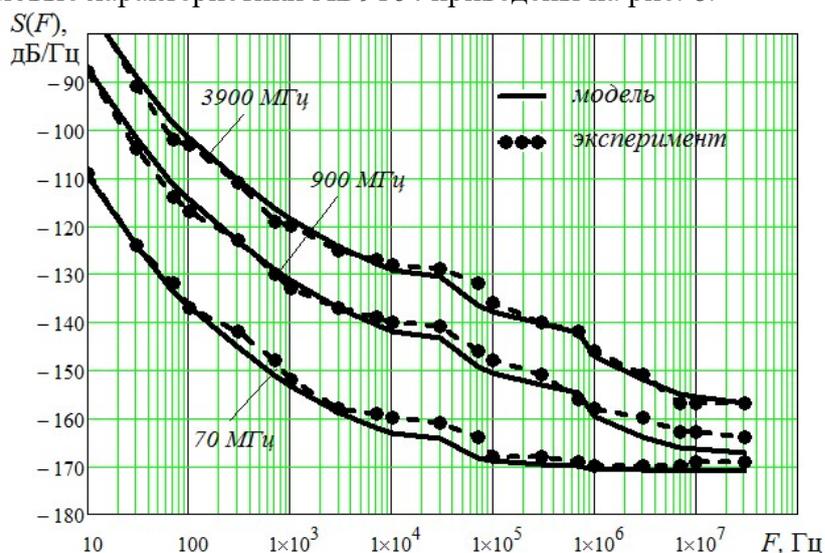


Рис. 8 - Экспериментальные и расчетные шумовые характеристики ЦАП AD9164 в режиме 2xNRZ с учетом шумов ГОЧ на выходных частотах 3900 МГц, 900 МГц и 70 МГц при тактовой частоте $f_T = 4$ ГГц

Как видно, предложенная модель СПМ фазовых шумов ЦАП с достаточной точностью аппроксимирует экспериментальные зависимости. Небольшой выброс в экспериментальных характеристиках обусловлен СПМ фазовых шумов опорного генератора.

Выводы

Таким образом, предложенная математическая модель спектральной плотности мощности фазовых шумов в одной боковой полосе частот цифро-аналоговых преобразователей с достаточно высокой точностью соответствует экспериментальным характеристикам и позволяет теоретически исследовать шумовые характеристики быстродействующих ЦАП при любых выходных частотах.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук МК-4044.2021.4, Совета по грантам Президента Российской Федерации

Литература

1. High Speed DAC [Электронный ресурс]: сайт компании Analog Devices, Inc., 2020. URL: <http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/high-speed-dac-converters.html>

2. High-Speed DACs [Электронный ресурс]: сайт компании MaximIntegrated, 2020. URL: <https://para.maximintegrated.com/en/results.mvp?fam=hsdacs&tree=master>
3. High-Speed DACs [Электронный ресурс]: сайт компании Texas Instruments, 2020. URL: <http://www.ti.com/data-converters/dac-circuit/high-speed/products.html>
4. Evaluating High Speed DAC Performance by Walt Kester - Analog Devices MT-013 Tutorial.
5. Ткаченко А. Прямая цифровая модуляция: принципы и решения // Электроника НТБ. 2014. №3. С. 162-174.
6. Рыжков, А.В. Синтезаторы частот в технике радиосвязи / А.В. Рыжков, В.Н. Попов. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
7. Kroupa, V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. (1998) – John Wiley & Sons, Ltd. –P. 396
8. Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis. 1999, Analog Devices, Inc.
9. John Esterline. Phase noise: Theory versus practicality. – Microwave journal 51(4), April 2008. – pp. 72-86.
10. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., “Research of Phase Noise of Direct Digital Synthesizers,” in Proc. of the 2011 IEEE Int. Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2011, Krasnoyarsk, Russia, September 15-16, 2011, pp. 168-171.
11. 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. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1.
12. Ромашов В.В., Ромашова Л.В. Моделирование шумовых характеристик интегральных цифровых вычислительных синтезаторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011, №4. С.20-23