

УДК 527.624

Обзор методов моделирования шумовых характеристик устройств формирования радиосигналов

Ромашова Л.В., Сочнева Н.А.

В статье приведен обзор методов моделирования шумовых характеристик устройств формирования радиосигналов. Показано, что уточненные модели спектральной плотности мощности фазовых шумов формирователей сигналов и методика расчета коэффициентов модели способна существенно повысить точность модели. Предложенная методика эффективна для моделирования СПМ фазовых шумов конкретных типов генераторов, используемых для построения устройств формирования радиолокационных сигналов. Данная методика показала хорошую применимость для оценки шумовых характеристик формирователей высокочастотных сигналов при недостаточности априорных данных.

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

Спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов $S_{\phi}(F)$ определяется как отношение мощности шумов на частоте F одной боковой полосы в полосе частот 1 Гц к мощности сигнала, и является одной из основных технических характеристик, определяющей качество устройств формирования радиосигналов.

Для теоретического анализа шумовых характеристик радиоустройств используют модели СПМ фазовых шумов на основе степенных функций [1]. Они позволяют осуществить проектирование различных радиоустройств, не прибегая к сложным экспериментальным исследованиям.

Целью данной работы является обзор методов формирования математических моделей спектральной плотности мощности фазовых шумов в одной боковой полосе устройств формирования радиосигналов на основе экспериментальных характеристик при недостаточности исходных данных.

В [2] предложена модель для представления спектральных плотностей мощностей фазовых флуктуаций цифрового вычислительного синтезатора (ЦВС), основанная на степенных функциях вида

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

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, $K_{\text{ЦВС}} = f_{\text{out}}/f_T$ -

коэффициент передачи ЦВС, f_{out} и f_T - выходная и тактовая частоты ЦВС,

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

шумы квантования, N - количество разрядов ЦАП.

Алгоритм определения коэффициентов СПМ фазовых шумов k_i по экспериментальным шумовым характеристикам, взятым из описания интегральных ЦВС, предложен в [3]. Число таких характеристик обычно очень ограничено.

Модель СПМ фазовых шумов для низких выходных частот ЦВС, полученная по данной методике, имеет заметную погрешность, которая составляет 3-5 дБ/Гц. С ростом выходной частоты погрешность уменьшается [2].

Для уменьшения погрешности модели в [4,5] предложена модель СПМ фазовых шумов ЦВС, основанная на принципе регрессии выборки данных линейной комбинацией

функций вида $\sum_{i=0}^2 C_i F^{-i}$. СПМ фазовых шумов при низкой выходной частоте ЦВС задается по точкам и при помощи системы математического моделирования (например, MathCad) вычисляются коэффициенты C_i . Коэффициенты k_1 и k_2 определяются по формулам $k_1 = \lg C_1$, $k_2 = \lg C_2$. Для нахождения коэффициентов k_3 и k_4 составляется система уравнений с использованием значений экспериментальных СПМ фазовых шумов при максимальной отстройке для различных выходных частот ЦВС. Ее решение запишется в виде

$$k_4 = \lg \left(\frac{10^{S_{об}(F, f_{out1})/10} - 10^{S_{об}(F, f_{out2})/10}}{\left(\frac{f_{out1}}{f_T}\right)^2 - \left(\frac{f_{out2}}{f_T}\right)^2} \right),$$

$$k_3 = \lg \left(10^{S_{об}(F, f_{out2})/10} - 10^{k_4 \left(\frac{f_{out2}}{f_T}\right)^2} \right). \quad (2)$$

Расчитанные по данной методике шумовые характеристики, при сравнении их с экспериментальными, отличаются меньшей погрешностью (особенно на невысоких выходных частотах).

Результаты моделирования показывают, что предложенная уточненная модель спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов и методика расчета коэффициентов модели позволила существенно повысить (на 3-5 дБ/Гц) точность модели.

Подобный подход мало эффективен в случае создания модели спектральной плотности мощности фазовых шумов генераторов сигналов, так как диапазон изменений значений СПМ их фазовых шумов существенно выше и достигает 90 – 100 дБн/Гц (по сравнению с 40 - 50 дБн/Гц ЦВС). Ввиду большого количества линейного сочетания функций, локализации экспериментальных точек на узком интервале, а также природы и свойств функций, получаемая в программе матрица коэффициентов является плохо обусловленной. Вследствие этого результат может получиться с

большой ошибкой, а коэффициенты C_i отрицательными.

В [1] приводится модель СПМ фазовых шумов для генераторов, управляемых напряжением (ГУН). В данную формулу уже подставлены известные экспериментальные значения, а также учтены шумы, вносимые управляющей системой:

$$S_{ГУН}(F) = \frac{1}{F^3} \cdot 10^{-11,6} \cdot \frac{f_0^2}{Q^2} + \frac{1}{F^2} \cdot 10^{-15,6} \cdot \frac{f_0^2}{Q^2} + \frac{10^{-11}}{F} + 10^{-15}, \quad (3)$$

где Q – добротность нагруженного резонатора; f_0 – частота генератора; F – отстройка частоты от f_0 .

В [5] приведена графическая зависимость результирующей шумовой характеристики ГУН $S(F)$ и ее составляющих соответствующих степеней. Показан вклад, вносимый каждой из составляющих при различных отстройках F : при малых F сильнее, влияет составляющая с третьей степенью, затем со второй, а нулевая вносит существенный вклад только при больших отстройках выше нескольких мегагерц. Составляющая же с первой степенью существенного влияния на результат не оказывает (ее вклад более чем на 15 дБ меньше всех остальных). Таким образом, из

уравнения $g(F) = \sum_{i=2}^3 C_i F^{-i}$ можно определить

два коэффициента регрессионной модели, а

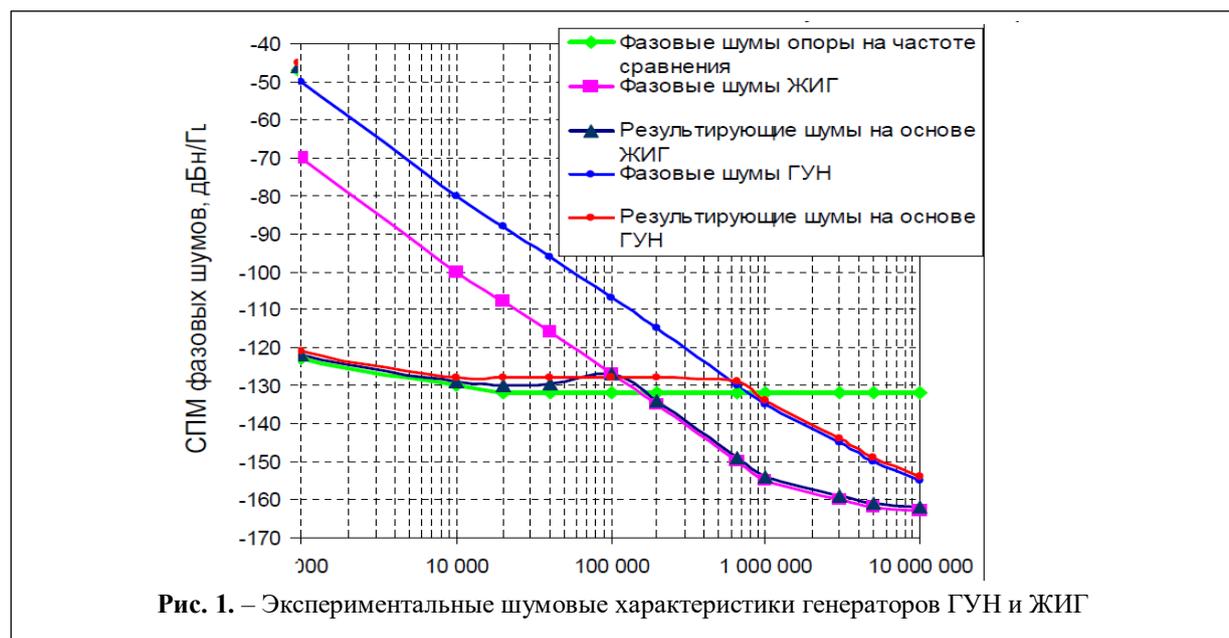


Рис. 1. – Экспериментальные шумовые характеристики генераторов ГУН и ЖИГ

коэффициент C_0 определить непосредственно из экспериментальных шумовых характеристик.

В [6] приведены экспериментальные характеристики генераторов ГУН и ЖИГ, на примере которых покажем применимость описанной выше методики – рис. 1.

По графическим зависимостям видно, что для генератора ЖИГ составляющие с 3-ей, 2-ой и 1-ой степенями особенно значимы на частотах отстройки от 1 кГц до 1 МГц, для ГУН – до 3 МГц. Исходя из этого, строим матрицы $S_{ЖИГ}(F)$ и $S_{ГУН}(F)$:

$$F = (1000 \ 3000 \ 10000 \ 30000 \ 100000 \ 300000 \ 1000000)^T,$$

$$S_{ЖИГ} = (10^{-7} \ 10^{-8.5} \ 10^{-10} \ 10^{-11.2} \ 10^{-12.7} \ 10^{-14} \ 10^{-15.5})^T,$$

$$F = (1000 \ 3000 \ 10000 \ 30000 \ 100000 \ 300000 \ 1000000)^T,$$

$$S_{ГУН} = (10^{-5} \ 10^{-6.4} \ 10^{-8} \ 10^{-9.2} \ 10^{-10.6} \ 10^{-12} \ 10^{-13.4} \ 10^{-14.4})^T.$$

С помощью функции программы MathCad $linfit(F,S,g)$ получаем следующие значения:

$$C_{ЖИГ2} = 3,498 \cdot 10^{-4}, \quad C_{ЖИГ3} = 84,373,$$

$$k_{ЖИГ2} = -3,456, \quad k_{ЖИГ3} = 1,926 \text{ и}$$

$$C_{ГУН2} = 0,016, \quad C_{ГУН3} = 9,984 \cdot 10^{-3},$$

$k_{ГУН2} = -1,808, k_{ГУН3} = 4$. Из рисунка определяем коэффициенты при нулевой степени F – как показатель степени 10 при частоте отстройки 10 МГц: $k_{ЖИГ0} = -16,2, k_{ГУН0} = -15,5$.

Таким образом, математические модели СПМ фазовых шумов ЖИГ и ГУН принимают вид [5]:

$$S_{ЖИГ}(F) = \frac{10^{1,926}}{F^3} + \frac{10^{-3,456}}{F^2} + 10^{-16,2}, \quad (4)$$

$$S_{ГУН}(F) = \frac{10^4}{F^3} + \frac{10^{-1,808}}{F^2} + 10^{-15,5}, \quad (5)$$

На рис. 2 и 3 приведены зависимости, рассчитанные по формулам (3), (4) и (5), а также их сравнение с экспериментальными графиками.

Погрешность зависимости СПМ фазовых шумов генераторов, построенных по обобщенной формуле (3), объясняется тем, что она требует точного знания величины добротности используемой контурной системы. Предложенная методика позволяет получить математическую модель шумовых характеристик генератора по его экспериментальным данным с минимальной погрешностью в несколько дБ.

В [7] исследовалась возможность применения данной методики для моделирования СПМ фазовых шумов конкретных типов генераторов, используемых для построения устройств формирования радиолокационных сигналов. Моделирование проводилось для кварцевого генератора ГК219-ТС производства АО «Морион» и ГУН из состава синтезатора частоты 1508МТ015 производства АО «ПКК Миландр».

Результирующие математические модели СПМ фазовых шумов, полученные по описанной выше методике, имеют следующий вид:

$$S_{ГК219}(F) = \frac{10^{-7}}{F^3} + \frac{10^{-9,9}}{F^2} + \frac{10^{-13,02}}{F^1} + 10^{-16,8}, \quad (6)$$

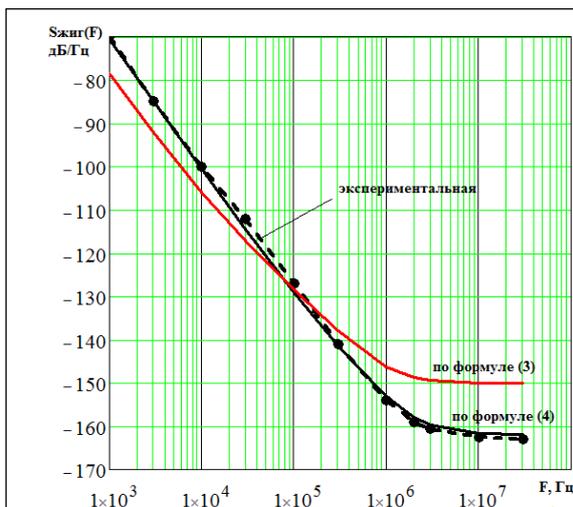


Рис. 2. Теоретические и экспериментальная шумовые характеристики ЖИГ

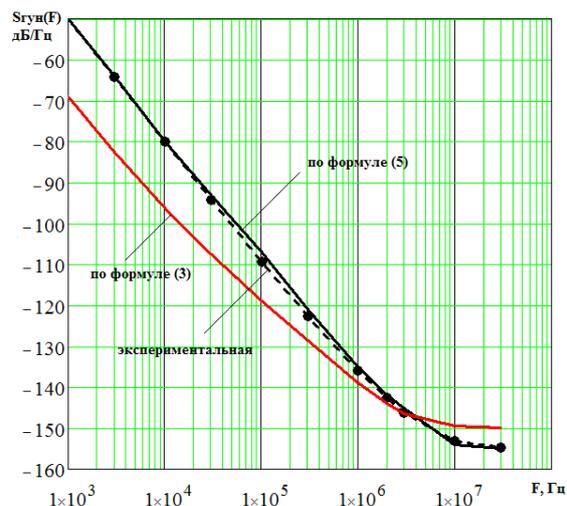


Рис. 3. Теоретические и экспериментальная шумовые характеристики ГУН

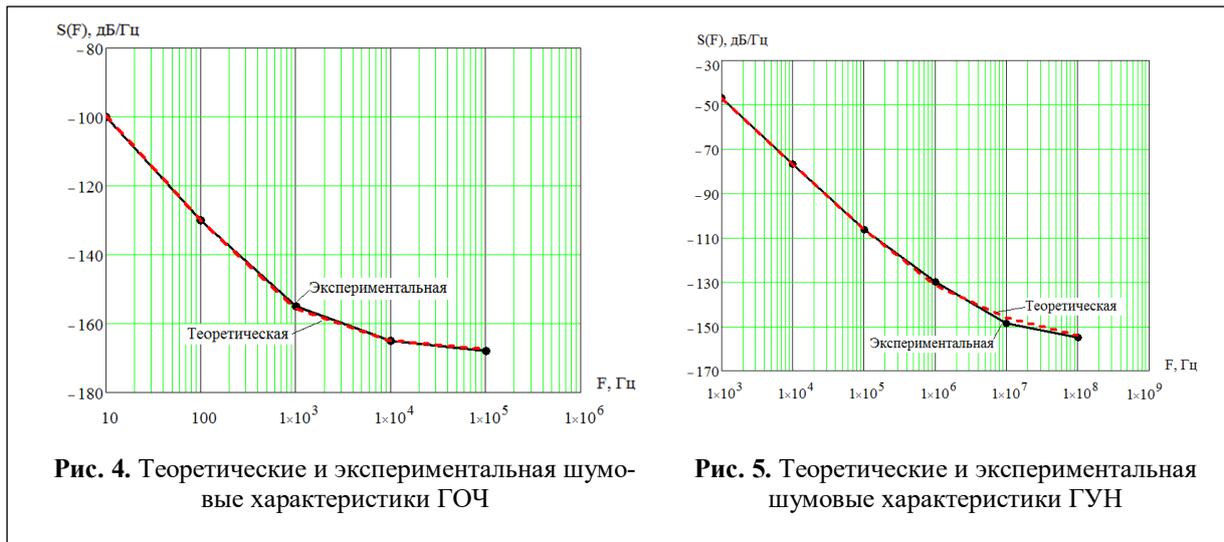


Рис. 4. Теоретические и экспериментальная шумовые характеристики ГОЧ

Рис. 5. Теоретические и экспериментальная шумовые характеристики ГУН

$$S_{158MT015}(F) = \frac{10^{1,35}}{F^4} + \frac{10^{4,3}}{F^3} + \frac{10^{-1,51}}{F^2} + \frac{10^{-7,71}}{F} + 10^{-15,7} \cdot (7)$$

Рассчитанные по данным выражениям СПМ фазовых шумов приведены на рис. 4 и 5.

Можно видеть, что обе математические модели СПМ фазовых шумов имеют погрешность не более 3 дБ/Гц. Это говорит о том, что метод регрессионного моделирования позволяет с малой погрешностью оценивать шумовые характеристики конкретных устройств формирования радиосигналов. Метод на основе экспериментальных характеристик позволяет минимизировать время на расчет коэффициентов аппроксимации и не требует точного знания добротности контурной системы.

Однако данная методика эффективна лишь при достаточности имеющихся экспериментальных шумовых характеристик. Часто бывает, что в техническом описании устройства приводится лишь несколько численных значений СПМ фазовых шумов.

Рассмотрим математическую модель СПМ фазовых шумов в одной боковой полосе ЦАП на основе модели для ЦВС: [8]

$$S_{ЦАП}(F) = K_{ЦАП}^2 \left(\frac{10^{k_2}}{F^2} + \frac{10^{k_1}}{F} + 10^{k_4} \right) + 10^{k_3} + S_{кв}, (8)$$

где F - отстройка от несущей частоты, $K_{ЦАП} = f_{out} / f_T$ - коэффициент передачи

ЦАП, f_{out} и f_T - выходная и тактовая частоты

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

шумы квантования, N - количество разрядов ЦАП.

Для примера определения коэффициентов аппроксимации K_i воспользуемся техническим описанием цифро-аналоговых преобразователей LTC2000A и LTC2000 [9]. В техническом описании этих 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, еще 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 приведен в таблице 1.

Выражение (8) показывает, что спектральная плотность мощности фазовых шумов в одной боковой полосе в значительной мере определяется несколькими шумовыми составляющими. Коэффициент k_1 определяет фликкер-шумы $1/F$. Их вклад наиболее существенен, так как им соответствует линейный участок шумовой характеристики в диапазоне частот 100-10000 Гц с наклоном 10 дБ/дек. СПМ

Таблица 1. Параметры цифро-аналогового преобразователя LTC2000A

			S	
1	Noise Spectral Density 0dBFS Single Tone, $f_T = 2.7\text{Gps}$ N=16	$f_{out} = 100\text{ MHz}$ $f_{out} = 350\text{ MHz}$ $f_{out} = 550\text{ MHz}$ $f_{outmax} = 950\text{ MHz}$	$S_{изм2} = -164$ -158 -155 $S_{NSD} = -153$	dBm/Hz dBm/Hz dBm/Hz dBm/Hz
2	Phase Noise $f_T = 2.7\text{Gps}$, $f_{out} = 65\text{ MHz}$ 0 dBFS Single Tone	$F_1 = 10\text{ kHz}$ $F_2 = 1\text{ MHz}$	$S_{изм1} = -141$ -156	dBc/Hz dBc/Hz

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 . Коэффициент k_2 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 нахождения коэффициента k_1 воспользуемся выражением из [3]:

$$k_1 = \lg \left(\frac{10^{-S_{изм1}(F_1, f_{out\ min})/10} F_1}{(K_{ЦАП\ min})^2} \right). \quad (9)$$

Здесь $S_{изм1}(F_1, f_{out\ min})$ – значение СПМ фазового шума в дБ/Гц для наименьшей выходной

частоты $f_{out\ min}$ ЦАП при частоте отстройки F_1 (наименьший $K_{ЦАП\ min} = f_{out\ min} / f_T$) [9].

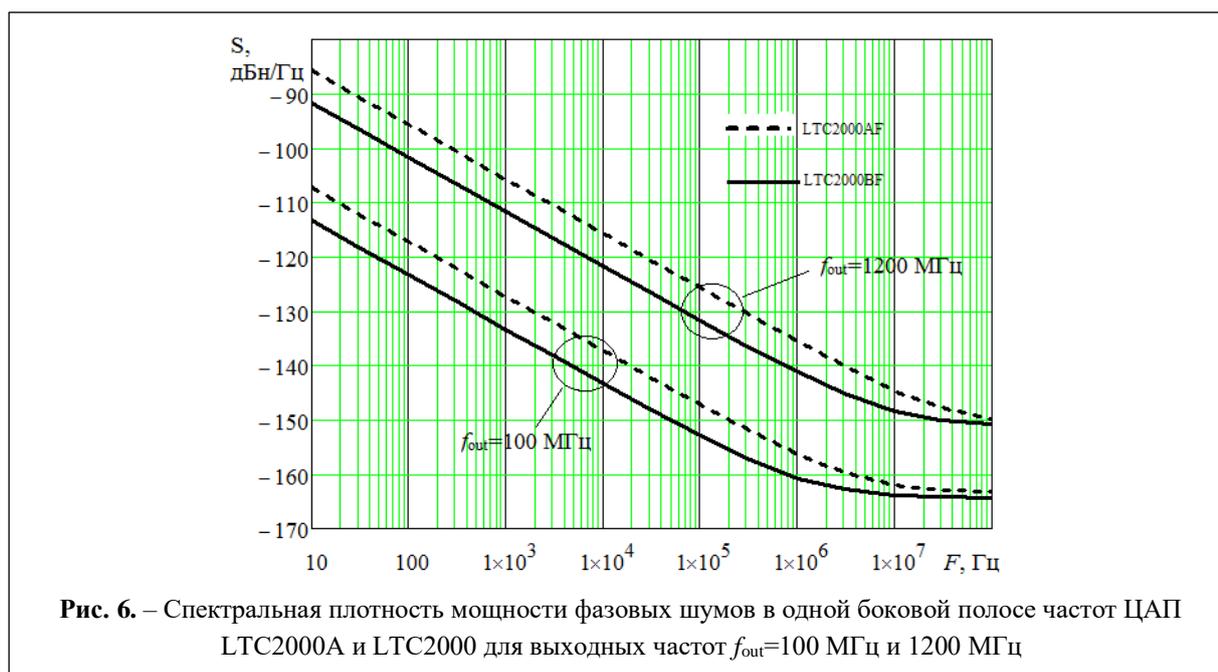
Коэффициенты k_3 и k_4 определяются для наименьшей и наибольшей выходных частот ЦАП (без учета шумов квантования):

$$k_3 = \lg(10^{-S_{изм2}(F_2, f_{out\ min})/10}),$$

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

Рассчитанные по формулам (9) и (10) коэффициенты k_1 , k_3 и k_4 равны: для LTC2000A - $k_1 = -6,88$, $k_3 = -16,4$, $k_4 = -14,43$; для LTC2000 - $k_1 = -7,54$, $k_3 = -16,5$, $k_4 = -14,5$. Рассчитанные шумовые характеристики обеих микросхем приведены на рис. 6.

Естественные шумы обеих микросхем соответствуют данным из технических описа-



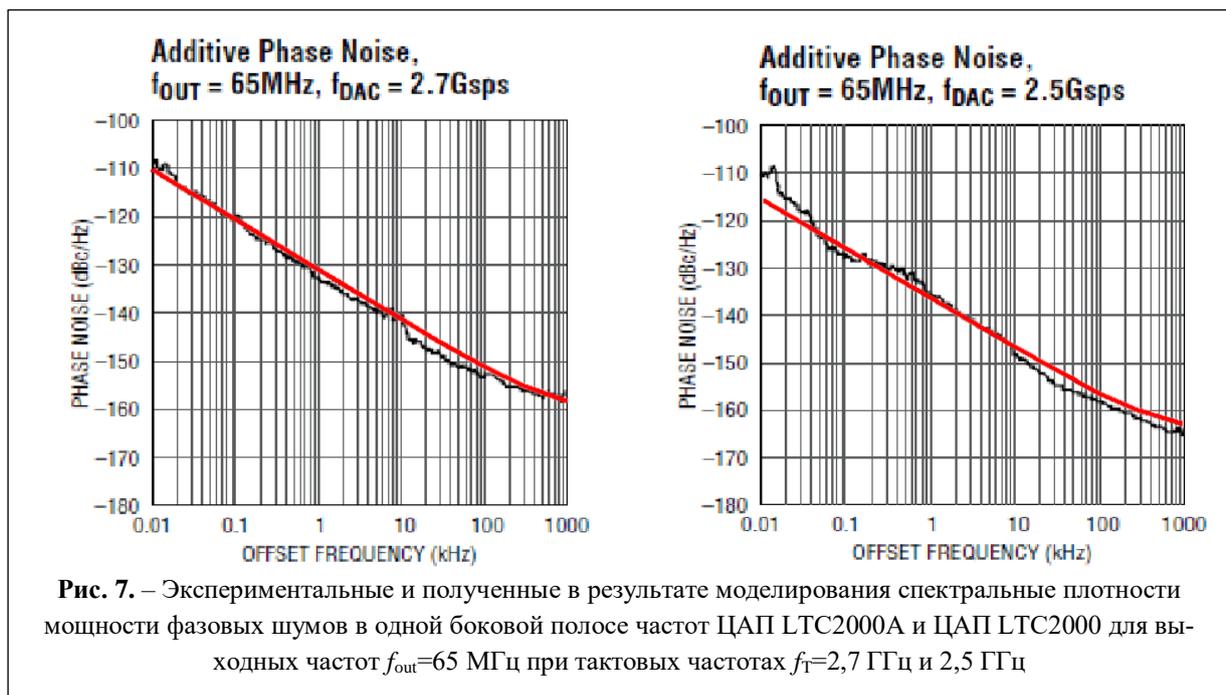
ний. На рис. 7 приведено сравнение экспериментальных характеристик ЦАП [7] с построенными по полученным моделям [8].

Можно наблюдать практически полное совпадение характеристик. Это говорит о пригодности разработанных моделей для оценки шумовых характеристик формирователей высокочастотных сигналов без создания экспериментального образца.

Таким образом, можно сделать следующие выводы: предложенная в [3] уточненная модель спектральной плотности мощности позволяет существенно повысить точность моделей цифровых вычислительных синтезаторов, генераторов сигналов, цифро-аналоговых преобразователей. Данная методика показала хорошую эффективность при моделировании СПМ фазовых шумов конкретных типов генераторов, используемых для построения устройств формирования радиолокационных сигналов. Исследования доказали ее применимость при недостаточности имеющихся данных, что позволяет использовать ее при непосредственном проектировании формирователей высокочастотных сигналов без создания экспериментального образца.

Литература

1. Ryzhkov A.V., Popov V.N. Sinteziatory's Priests of frequencies in the technician of a radio communication. Moscow: Radio i swjaz, 1991, 264 p.
2. 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.
3. В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, "Методика расчета коэффициентов аппроксимации спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов," Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2012, №1, С. 23-26.
4. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K. The regression model of power spectral density of phase noise of direct digital synthesizers // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016; National Research University "Higher School of Economics" Moscow; Russian Federation; 12 May 2016 through 14 May 2016; Category numberCFP16794-CDR; Code 122173.
5. Ромашов В.В., Ромашова Л.В. Регрессионные модели шумовых характеристик генераторов сигналов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017, №3. С. 69 – 75.
6. Бельчиков С.А. Фазовый шум: как спуститься ниже -120 дБн/Гц на отстройке 10 кГц в диапазоне частот до 14 ГГц, или Борьба за децибелы // Компоненты и технологии, 2009, №5. С. 139 – 146.
7. Ромашов В.В., Грошков И.Д. Моделирование шумовых характеристик генераторов сигналов радиолокационных систем // Методы и устройства



передачи и обработки информации. 2020, выпуск 22. С. 10 – 15.

8. В.В.Ромашов, Л.В.Ромашова, И.Д.Грошков, Н.А.Сочнева Математические модели шумовых характеристик цифро-аналоговых преобразователей // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021, №2. С. 50 – 57.

9. 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>.

Поступила 04 сентября 2021 г.

The article provides an overview of methods for modeling the noise characteristics of radio signal generation devices. It is shown that the refined models of the spectral power density of phase noise of signal generators and the method of calculating the coefficients of the model can significantly improve the accuracy of the model. The proposed technique is effective for simulating SPM phase noise of specific types of generators used to build radar signal generation devices. This technique has shown good applicability for assessing the noise characteristics of high-frequency signal generators with insufficient a priori data.

Key words: Spectral power density, phase noise, digital computing synthesizer, digital-to-analog converters, approximation coefficients.

Ромашова Любовь Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: romashovamur@yandex.ru.

Сочнева Наталья Александровна – аспирант кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: sochnewa.natalya@yandex.ru.

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