

УДК 621.396.967

Н.П. Кандырин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВЫХ СИНТЕЗАТОРОВ СИГНАЛОВ

*Исследованы шумовые характеристики цифровых синтезаторов сигналов (ЦСС), проведен теоретический анализ зависимости спектральной плотности шумов выходного сигнала от параметров синтезатора.*

**Ключевые слова:** цифровые синтезаторы сигналов, спектральная плотность мощности, фазовые шумы.

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ публикаций.

Цифровые синтезаторы частот (ЦСЧ) и цифровые синтезаторы сигналов (ЦСС) находят в последние годы все большее применение в современных радиотехнических системах, таких как мобильные средства связи, прецизионные измерительные устройства, системы радиолокации и радионавигации.

Достоинства ЦСС, реализующих метод прямого синтеза, определили их широкое применение при формировании высокостабильных сигналов в различных радиосистемах.

Одним из важных параметров синтезаторов сигналов является спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов. Экспериментальные значения этих шумов можно найти в описании на данные микросхемы выпускаемых, например, фирмой Analog Devices. Однако такая информация приводится для одного или нескольких значений выходных частот, которая для проектирования произвольных формирователей сигналов на ЦСС недостаточно, а для ЦСС изготовляемых на дискретных элементах таковых совсем нет. Экспериментальные же исследования шумовых характеристик требуют дорогостоящего оборудования. Поэтому предварительный выбор ЦСС по требуемому уровню СПМ фазовых шумов можно провести, воспользовавшись теоретическими моделями СПМ фазовых шумов.

**Целью статьи** является моделирование и исследование шумовых характеристик цифровых синтезаторов сигналов как интегральных, так и произвольной конфигурации.

### Основной материал

При моделировании формирователей сигналов на ЦСС используют аппроксимацию относительной спектральной плотности (ОСП) математическими выражениями, с помощью которых можно с определенной точностью производить оценку уровня фазовых шумов.

Оценка фазового шума ЦСС, основанного на результатах экспериментальных исследований, дана

в некоторых публикациях. Некоторые модели ОСП фазовых шумов ЦСС приведены в [1, 2].

Однако их подробного исследования и соответствия экспериментальным данным не приводится. В [3, 4] получены модели для конкретных случаев, поэтому пользоваться ими нельзя. Поэтому в дальнейшем мы попытаемся на сравнении имеющихся моделей ОСП фазовых шумов ЦСС и соответствие их реальным спектральным характеристикам ЦСС получить модель ОСП достаточной для практического применения точностью проводить анализ шумовых характеристик синтезаторов при произвольном наборе данных.

Воспользуемся моделью ОСП фазовых шумов Кроупа [2]:

$$S_{\text{кро}}(F) \approx \frac{10^{-10 \pm 2}}{F} + \frac{2^{-2(N-1)}}{3 \cdot f_T}$$

Для сравнения используем модель, предложенную в [5]:

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

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

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

СПМ шума квантования [5],  $N$  – количество разрядов ЦАП,  $f_{\text{out}}, f_T$  – выходная и тактовая частоты.

В качестве реальных спектральных характеристик ЦСС выберем характеристики интегрального синтезатора типа AD9911, для которого количество разрядов ЦАП  $N = 10$ , а коэффициенты аппроксимации СПМ фазовых шумов согласно [6] соответственно равны

$$k_1 = -9.0, k_2 = -8.3,$$

$$k_3 = -17.8, k_4 = -14.8.$$

Результаты расчетов приведены на рис. 1 для двух частот  $f_{out} = 15\text{МГц}$  и  $75\text{МГц}$  при тактовой частоте

$$f_T = 500\text{МГц}.$$

Из приведенных зависимостей видно, что модель Кроупа приближенная и не зависит от выходной частоты. Предлагаемая в [5] модель с высокой точностью соответствует реальным спектральным составляющим шума на разных выходных частотах.

Для расчета СПМ фазового шума ЦСС выполненных на дискретных элементах экспериментальных зависимостей не существует. Поэтому попытаемся составить и проанализировать обобщенную модель СПМ фазового шума на уже полученных коэффициентах  $k_i$  для ряда интегральных синтезаторов фирмы Analog Devices.

Для рассчитанных по [6] коэффициентов аппроксимации  $k_1, k_2, k_3, k_4$  рассчитаем средние значения этих коэффициентов с тем, чтобы составить обобщенную модель для расчета СПМ фазовых шумов для любого ЦСС с приемлемыми погрешностями. Расчетные данные сведены в табл. 1.

Используя рассчитанные средние данные коэффициентов аппроксимации  $k_i$ , составим обобщенную модель СПМ фазовых шумов ЦСС. Она может быть записана в следующем виде:

$$S_{об}(F) = (f_{out}/f_T)^2 \times \left( \frac{10^{-8,0 \pm 1,0}}{F^2} + \frac{10^{-8,9 \pm 0,6}}{F} + 10^{-14,1 \pm 0,7} \right) + (2) + 10^{-16,6 \pm 0,8} + 2^{-2N-0,59} (f_{out}/f_T).$$

На рис. 2, 3 приведено сравнение зависимостей СПМ фазовых шумов ЦСС AD9910 и AD9911, рассчитанных по формулам (1) и (2), с экспериментальными данными. Как видно из рисунков, максимальное отклонение рассчитанной СПМ фазовых шумов от экспериментальной на частоте  $F = 10\text{МГц}$  для ЦСС AD9910 составляет  $0,5\text{дБ/Гц}$  и для AD9911 –  $1\text{дБ/Гц}$  по формуле (1).

Расчет СПМ по выражению (2) дает несколько большую погрешность: для AD9910 –  $3\text{дБ/Гц}$ , а для AD9911 –  $2\text{дБ/Гц}$ .

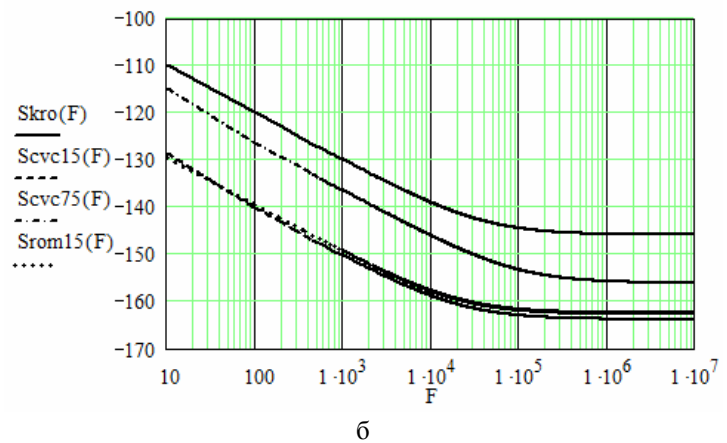
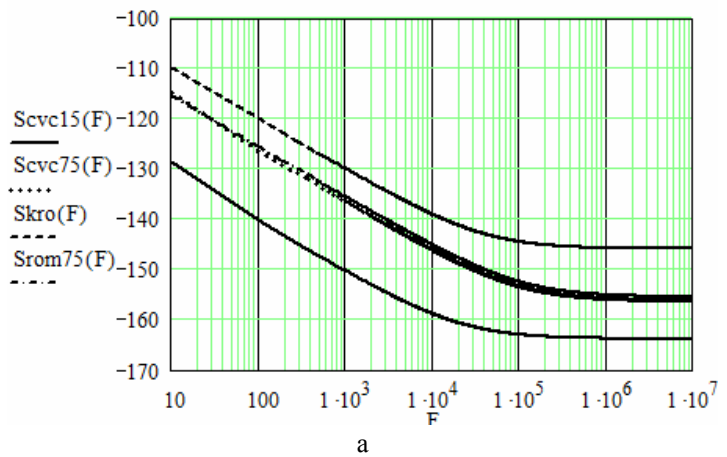


Рис. 1. Экспериментальные СПМ фазовых шумов синтезатора AD9911 (Scvc15(F), Scvc75(F)) и теоретические (Srom15(F), Srom75(F), Skro(F)) СПМ фазовых шумов ЦСС AD9911 для выходных частот 15МГц, 75МГц при тактовой частоте 500МГц

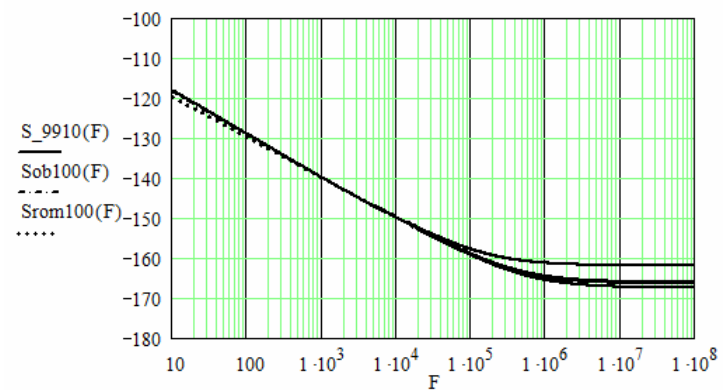


Рис. 2. Теоретические и экспериментальные СПМ фазовых шумов ЦСС AD9910 для выходной частоты 100 МГц при тактовой частоте 1ГГц

Таблица 1

Расчетные данные коэффициентов аппроксимации для ЦСС фирмы Analog Devices

ЦСС	N – кол. разряд ЦАП	k1	k2	k3	k4
1	2	3	4	5	6
AD9851	10	-8,2	-6,5	-15,9	-13,6
AD9858	10	-9,8	-8,8	-15,6	-13,4
AD9911	10	-9,0	-8,3	-17,8	-14,8

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
AD9913	10	-9,1	-8,7	-17,5	-14,3
AD9852	12	-9,3	-8,8	-16,2	-14,0
AD9910	14	-9,2	-8,4	-16,8	-14,5
AD9912	14	-9,2	-7,2	-17,2	-15,3
AD9951	14	-8,1	-6,4	-15,9	-13,6
AD9956	14	-8,3	-8,9	-16,5	-13,5
Сред. знач.		-8,9	-8,0	-16,6	-14,1
Ср.кв. откл.		0,6	1,0	0,8	0,7

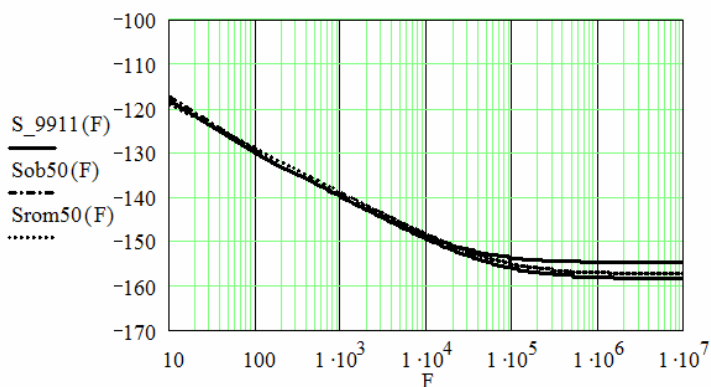


Рис. 3. Теоретические и экспериментальные СПМ фазовых шумов ЦСС AD9911 для выходной частоты 50 МГц при тактовой частоте 500 МГц

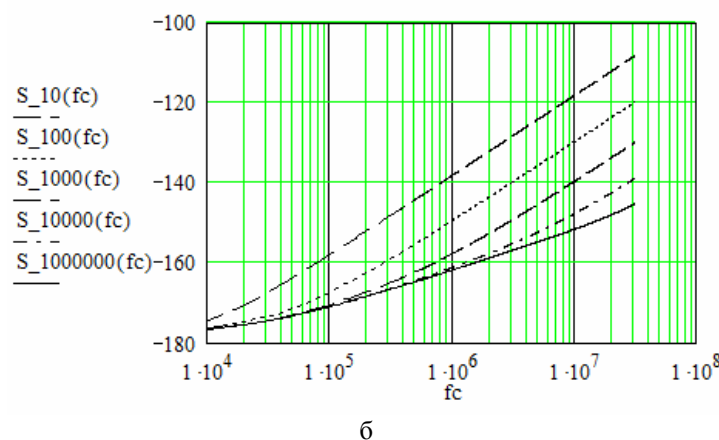
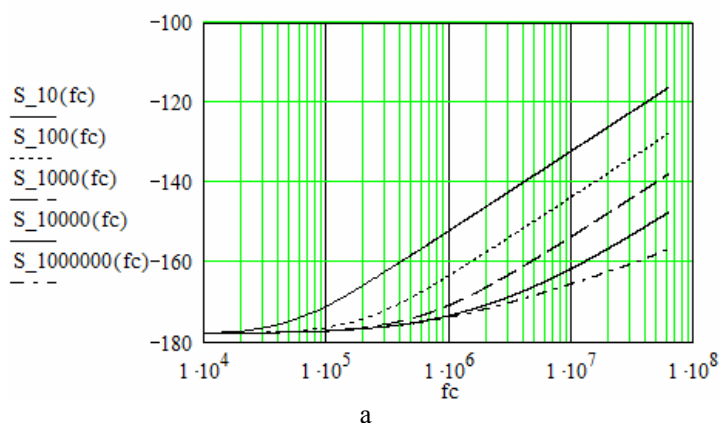


Рис. 4. СПМ фазовых шумов ЦСС AD9911 в зависимости от выходной частоты при различных частотах отстройки ( $F = 10, 100, 1000, 10^4, 10^6$  Гц), тактовая частота 500 МГц (а) и 100 МГц (б)

Примерно такие же величины погрешностей получаются и для других выходных частот.

Таким образом, применение обобщенной математической модели спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых синтезаторов сигналов со средними значениями коэффициентов аппроксимации позволяет с достаточной точностью рассчитывать шумовые характеристики для любых синтезаторов.

Рассмотрим теперь изменение уровня спектральной плотности мощности шумов в зависимости от выходной частоты для различных частот отстроек.

Для интегрального цифрового синтезатора сигналов AD9911 на рис. 4 приведены зависимости для значений тактовой частоты 500 МГц и 100 МГц соответственно.

Анализ полученных зависимостей показывает следующее: для AD9911, имеющего 10-разрядный ЦАП, минимальный уровень спектральной плотности мощности составляет  $-178$  дБ/Гц для выходных частот до  $10$  кГц в диапазоне частот отстроек до  $0,5 \cdot 10^4$  Гц при максимальной тактовой частоте этого синтезатора 500 МГц.

С уменьшением тактовой частоты в 5 раз уровень спектральной плотности мощности фазовых шумов увеличивается примерно на 12 дБ/Гц для любой выходной частоты и частот отстроек.

Аналогичные зависимости для цифрового синтезатора сигналов AD9910 приведены на рис. 5.

Увеличение разрядности ЦАП до 14 не приводит к ожидаемому уменьшению СПМ фазовых шумов.

У цифрового синтезатора сигналов AD9910 минимально возможное значение спектральной плотности мощности шумов на  $10 - 11$  дБ/Гц больше, чем у 10-разрядного AD9911, что объясняется большим уровнем собственных шумов ЦАП.

Уменьшение тактовой частоты синтезатора в пять раз для данного синтезатора приводит к увеличению уровня спектральной плотности мощности на  $13 - 15$  дБ/Гц.

С ростом выходной частоты наиболее быстро увеличиваются  $1/F$  и  $1/F^2$  шумы, то есть шумы при малых отстройках от несущей.

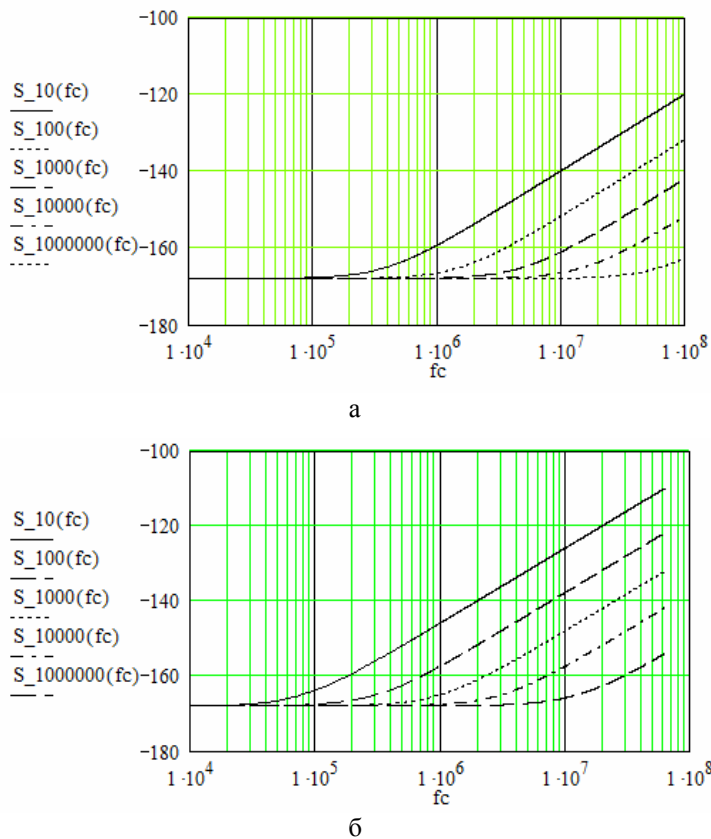


Рис. 5. СПМ фазових шумів ЦСС AD9910 в залежності від вихідної частоти при різних частотах отстройки ( $F = 10, 100, 1000, 10^4, 10^6$  Гц), тактова частота 1000 МГц (а) і 200 МГц (б)

## Выводы

Таким образом, полученное обобщенное и предложенное в (5) выражения для спектральной плотности мощности фазовых шумов ЦСС имеют небольшие расхождения в показателях, поэтому его можно использовать для расчета СПМ фазового шума.

Преимущество использования обобщенного выражения заключается в том, что не имея экспериментальных зависимо-

стей для вычисления аппроксимирующих коэффициентов  $k_i$ , можно с достаточной для практического применения точностью определить СПМ фазовых шумов ЦСС на дискретной элементной базе.

## Список литературы

1. Kroupa V.F. *Phase Lock Loops and Frequency Synthesis* / V.F. Kroupa. – John Wiley & Sons, Ltd, 2003, ISBN: 0-470-84866-9 – 320 p.
2. Kroupa V.F. *Direct Digital Frequency Synthesizers* / V.F. Kroupa. – John Wiley & Sons, Ltd, 1998. – 396 p.
3. Kuleshov V.N. *1/f Fluctuations Sources in Direct Digital Frequency Synthesizers and Their Contribution to the Output Oscillations Power Spectral Density* / V.N. Kuleshov, Y.H. Liu, B.E. Kuleshov // Proc. 1995 IEEE int. Freq. Control Symposium. – P. 282-287.
4. Kuleshov V.N. *Fundamental noise in direct digital frequency synthesizers* / V.N. Kuleshov, Y.H. Liu // Proc. 1995 IEEE int. Freq. Control Symposium. – P. 288-293.
5. Ромашова Л.В. *Моделирование спектральных характеристик цифровых вычислительных синтезаторов частот* / Л.В. Ромашова, А.В. Ромашов // Проектирование и технология электронных средств. – 2010. – №1.
6. Ромашова Л.В. *Методика расчета коэффициентов аппроксимации спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов* / Л.В. Ромашова, А.В. Ромашов // Проектирование и технология электронных средств. – 2011. – №1. – С. 22-25.

Поступила в редколлегию 20.03.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.И. Сухарецкий, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## МОДЕЛЮВАННЯ ШУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВИХ СИНТЕЗАТОРІВ СИГНАЛІВ

М.П. Кандирін

*Досліджено шумові характеристики цифрових синтезаторів сигналів, проведено теоретичний аналіз залежності спектральної щільності шумів вихідного сигналу від параметрів синтезатора.*

**Ключові слова:** цифрові синтезатори сигналів, спектральна щільність потужності, фазові шуми.

## MODELING NOISE CHARACTERISTICS DDS

N.P. Kandyrin

*DDS investigated noise characteristics, depending on the theoretical analysis of the noise spectral density of the output signal from the synthesizer parameters.*

**Keywords:** digital synthesizers signals, power spectral density, phase noise.