
УДК 621.396.967

Н.П. Кандырин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ШУМОВ ЦИФРОВЫХ СИНТЕЗАТОРОВ СИГНАЛОВ ТАБЛИЧНОГО ТИПА

Проведен теоретический анализ и получено выражение для расчета СПМ фазовых шумов выходного сигнала цифрового синтезатора табличного типа. Приведены результаты моделирования шумовых характеристик таких синтезаторов в сравнении с синтезаторами вычислительного типа.

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

Введение

Постановка проблемы. Неотъемлемым элементом большинства радиотехнических устройств

являются системы синтеза частот и сигналов. Один из основных типов синтезаторов частот – цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС). Высокое разрешение по частоте и фазе, максимально быстрый

переход на другую частоту без разрыва фазы, возможность управления частотой, фазой, а иногда и амплитудой по цифровому интерфейсу постоянно расширяют сферу применения ЦВС в различных областях техники. На разных этапах развития синтезаторов из-за отсутствия или недоступности интегральных ЦВС во многих радиоэлектронных изделиях нашли широкое применение ЦВС на ПЛИС и дискретных элементах [1, 2]. В последнее время используются преимущественно специализированные интегральные ЦВС выполненные, прежде всего, по технологии КМОП [3].

Одним из важных параметров синтезаторов сигналов является спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов.

Некоторые модели СПМ фазовых шумов ЦСС приведены в [4, 5]. Однако их подробного исследования и соответствия экспериментальным данным не приводится.

В [6, 7] получены модели СПМ для конкретных случаев, поэтому пользоваться ими нельзя.

Оценка фазовых шумов ЦВС, основанных на результатах экспериментальных исследований, приведены в [8, 9]. Экспериментальные значения этих шумов можно найти в описании на микросхемы выпускаемых, например, фирмой Analog Devices.

В [8] создана обобщенная математическая модель расчета СПМ фазовых шумов ЦВС, которая позволяет с достаточной точностью рассчитывать шумовые характеристики для любых синтезаторов.

Однако для цифровых синтезаторов табличного типа таких моделей не существует, как не существует и экспериментальных зависимостей фазовых шумов.

Целью статьи является разработка математической модели для расчета СПМ фазовых шумов цифровых синтезаторов табличного типа выполненных на дискретных элементах.

Основной материал

При моделировании формирователей сигналов на ЦСС используют аппроксимацию СПМ математическими выражениями, с помощью которых можно с определенной точностью производить оценку уровня фазовых шумов.

Здесь мы сделаем попытку на сравнении имеющихся моделей СПМ фазовых шумов ЦВС и соответствии их реальным спектральным характеристикам получить модель СПМ фазовых шумов для табличных синтезаторов. Этот класс синтезаторов отличается малыми габаритами, простотой изготовления и малым энергопотреблением. Обобщенная структурная схема цифрового синтезатора табличного типа приведена на рис. 1.

В таком синтезаторе методом формирования отсчетов функции \sin является табличный метод.

Перекодировочная таблица (Look Up Table) чаще всего размещается в ПЗУ. Код, который подается на адресные входы ПЗУ, является аргументом функции \sin , а выходной код ПЗУ равен значению функции для данного аргумента. Аргумент функции \sin , или фаза, в отличие от значения функции, меняется во времени линейно. Сформировать линейно меняющуюся во времени последовательность кодов гораздо проще, это способен сделать простой двоичный счетчик. Поэтому простейший табличный ЦСС выглядит так (рис. 1): двоичный счетчик (СТ) формирует адрес для ПЗУ, куда записана таблица одного периода функции \sin или коды амплитуды сложного сигнала.

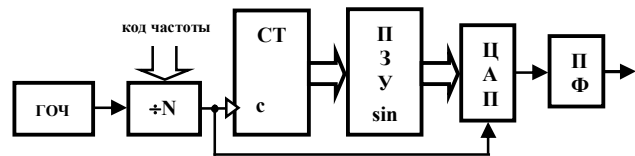


Рис. 1. Структурная схема табличного ЦСС

Далее, отсчеты с выхода ПЗУ поступают на ЦАП, который формирует на выходе дискретный синусоидальный или любой сложный ЧМ сигнал, подвергающийся фильтрации в полосовом фильтре (ПФ) или в ФНЧ и поступающий на выход. Для перестройки выходной частоты используется делитель частоты с переменным коэффициентом деления, на вход которого поступает тактовый сигнал с опорного генератора (ГОЧ). Такая структура синтезатора имеет свои недостатки. Основным из них является неудовлетворительная способность к перестройке по частоте. Поскольку тактовая частота испытывает деление на целое число, шаг перестройки будет переменным, причем, чем меньше коэффициент деления, тем больше относительная величина шага. Кроме того, изменение частоты опроса ПЗУ приводит к изменению всех параметров формируемого сигнала.

Поэтому ЦСС табличного типа, чаще всего используют в узкоспециализированной аппаратуре, где не предполагается менять параметры во время работы радиоустройств (например, в передатчике РЛС во время зондирования).

Итак, проведенный анализ литературы показал, что фазовые шумы любого ЦСС можно представить суммой трех составляющих: шумами генератора тактового сигнала с учетом коэффициента передачи ЦСС $K_{\text{ЦСС}}^2$, шумами квантования и собственными шумами элементов синтезатора [9]

$$S_{\text{сум}}(F) = S_{\text{Гоч}}(F) \cdot K_{\text{ЦСС}}^2 + S_{\text{кв}}(F) + S_{\text{собЦСС}}(F) \cdot (1)$$

Без первого слагаемого выражение представляет математическую модель СПМ фазовых шумов ЦСС. Так, в [4, 5] предлагается использовать для

математической модели СПМ фазовых шумов ЦСС соотношение

$$S_{\text{крос}}(F) = S_{\text{цап}} + S_{\text{дел}}(F), \quad (2)$$

т.е.

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

где
$$S_{\text{цап}}(F) = \frac{2^{-2(2N-1)}}{3 \cdot f_T} -$$

СПМ фазового шума ЦАП (шума квантования),

$$S_{\text{дел}}(F) = \frac{10^{-14 \pm 1} + 10^{-27 \pm 1} f_0}{F} + 10^{-16 \pm 1} + 10^{-22 \pm 1} f_0 -$$

СПМ собственных фазовых шумов ЦСС, как делителя частоты (на невысоких частотах возможно использования упрощенного выражения

$$S_{\text{дел}}(F) = \frac{10^{-14,7}}{F} + 10^{-16,5}), f_0 - \text{выходная частота.}$$

Учитывая это и тот факт, что быстродействие табличного ЦСС определяется в основном быстродействием ПЗУ входящего в его состав, а оно составляет единицы десятков мегагерц то выражение (3) примет следующий вид

$$S_{\text{тбЦСС}}(F) = \frac{10^{-14,7}}{F} + 10^{-16,5} + \frac{2^{-2(N-1)}}{3 \cdot f_T}. \quad (4)$$

На рис. 2, для сравнения, приведены зависимости СПМ фазовых шумов построенные по (4), и экспериментальные зависимости интегральных ЦСС AD9911 (AD9958, AD9959) при различных выходных частотах.

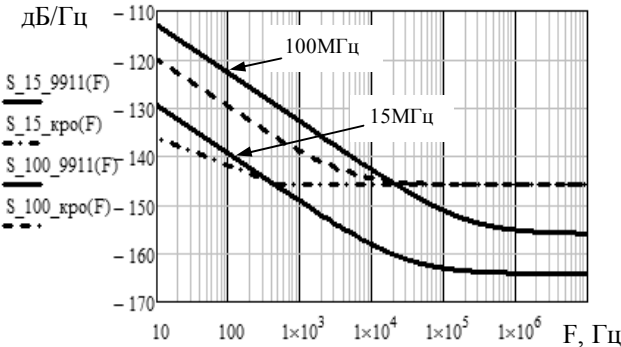


Рис. 2. Экспериментальные (сплошные) и теоретические (пунктирные) СПМ фазовых шумов AD9911 для выходных частот 15 МГц и 100 МГц при тактовой частоте 500 МГц

Из зависимостей рис. 2 видно, что погрешность рассчитанных СПМ фазовых шумов по отношению к экспериментальным при малых частотах отстройки достигает 8 дБ/Гц. Однако с повышением отношения $K_{\text{ЦСС}}^2 = (f_{\text{ВЫХ}}/f_T)^2$ погрешность достигает 10 – 17 дБ/Гц.

Поэтому выражение (4) для расчета СПМ фазовых шумов обладает большой погрешностью,

особенно для современных интегральных ЦВС, и не подходит для теоретического расчета фазовых шумов формирователей сигналов на основе ЦВС.

В табличных ЦСС для адресации ПЗУ используются, как правило, двоичные счетчики, которые являются делителем тактовой частоты с коэффициентом деления $f_T/f_{\text{ВЫХ}}$. Поэтому ЦСС уменьшает фазовые шумы тактового генератора в $(f_T/f_{\text{ВЫХ}})^2$ раз, а соотношение $K_{\text{ЦСС}}^2 = (f_{\text{ВЫХ}}/f_T)^2$ является коэффициентом передачи по шумам. В силу этого слагаемые представляющие делитель частоты в выражении (4) необходимо умножить на этот коэффициент.

Кроме этого, учтем в выражении и эффект передискретизации, когда синтезируемая частота и полоса пропускания фильтра после ЦАП меньше половины тактовой частоты (частоты дискретизации). Тогда уровень шумов уменьшается пропорционально $f_{\text{ВЫХ}}/f_T$ [10]. Далее, при увеличении выходной частоты амплитуда сигнала уменьшается в соответствии с коэффициентом передачи ЦАП $\left(\sin\left(\frac{\pi \cdot f_{\text{ВЫХ}}}{f_T}\right) / \left(\frac{\pi \cdot f_{\text{ВЫХ}}}{f_T}\right) \right)$, а шумы квантования остаются неизменными.

Тогда с учетом этого выражение для оценки СПМ фазовых шумов квантования ЦАП в относительных единицах представим в виде

$$S_{\text{квЦАП}}(F) = 2^{-2N-0,59} \times \left(\sin\left(\pi \cdot \frac{f_{\text{ВЫХ}}}{f_T}\right) / \left(\pi \cdot \frac{f_{\text{ВЫХ}}}{f_T}\right) \right)^{-2} \times \left(\frac{f_{\text{ВЫХ}}}{f_T^2} \right). \quad (5)$$

В силу того, что табличные синтезаторы работают на невысоких частотах, то окончательное выражение для расчета СПМ фазовых шумов табличных цифровых синтезаторов сигналов, с небольшой коррекцией аппроксимирующих коэффициентов, примет вид

$$S_{\text{тбЦСС}}(F) = \left(\frac{10^{-8,9}}{F} + 10^{-19} \right) \times \left(\frac{f_{\text{ВЫХ}}}{f_T} \right)^2 + 2^{-2N-0,59} \cdot \left(\frac{f_{\text{ВЫХ}}}{f_T^2} \right). \quad (6)$$

На рис. 3 приведены зависимости СПМ фазовых шумов табличного синтезатора рассчитанных по (6) для различной разрядности ЦАП (N = 10, 12 и 14) при синтезируемой частоте 5 МГц и тактовых частотах 25 и 50 МГц.

Из графиков рис. 3 видно, что с увеличением разрядности ЦАП фазовые шумы уменьшаются на 12 дБ/Гц на каждые 2 разряда. При увеличении тактовой частоты в два раза (рис. 3, б) фазовые шумы

уменьшаются на 12 дБ/Гц по сравнению с тактовой частотой 25 МГц.

Представляет интерес, какой вид шумов оказывает определяющий вклад в выходной общий шум табличных синтезаторов. Для этого воспользуемся отдельными составляющими фазовых шумов входящих в выражение (1) из [9].

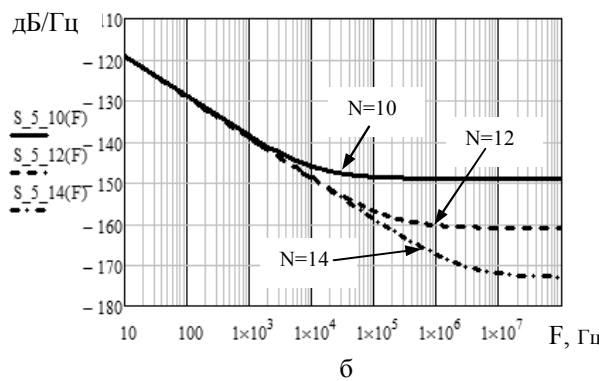
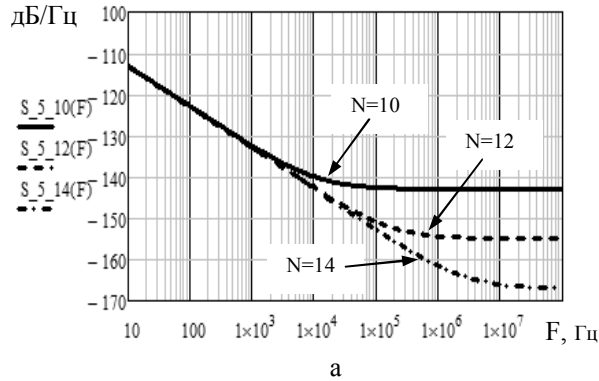


Рис. 3. СПМ фазовых шумов табличного ЦСС при разрядности ЦАП равным N = 10, 12 и 14 а – при f_T = 25 МГц; б – при f_T = 50 МГц

Уровень фазовых шумов ГОЧ в соответствии с [11] определяется выражением

$$S_{\text{Гоч}}(F) = \frac{10^{-7,82}}{F^3} + \frac{10^{-9,86}}{F^2} + \frac{10^{-12,7}}{F} + 10^{-15,8}. \quad (7)$$

Собственные фазовые шумы синтезатора можно представить как сумму СПМ составляющих, вызванных естественным (тепловым) шумом и фликкер-шумом (1/f)

$$S_{\text{соб}}(F) = S_{\text{ест}}(F) + S_{\text{флик}}(F). \quad (8)$$

Выражением для оценки естественных фазовых шумов ЦСС, вызываемых в основном ЦАП, при определенных параметрах, воспользуемся из [7]

$$S_{\text{ест}} = \frac{(\pi k / K)^2}{(\sin(\pi k / K))^2} S_1 + \frac{(\pi k / K)^2 [3 - \sin(2\pi k / K) / (2(2\pi k / K))]}{(\sin(\pi k / K))^2} S_2 + S_3, \quad (8)$$

где k – код, устанавливающий частоту, K = 2^R – емкость вычислителя кодов фазы (ВКФ), R – количество разрядов ВКФ, k/K = f_{вых}/f_T = K_{ЦСС} – коэффициент передачи ЦСС, f_{вых} и f_T выходная и тактовая частоты ЦСС, S₁, S₂, S₃ – спектральные плотности мощности шумов эквивалентных источников шума, величины которых определяются элементной базой ЦАП и параметрами входящих в него элементов.

Для конкретного примера ЦАП на ЭСЛ типа К1118ПА3 (К1118ПА2), подставив данные из [7], получаем значения СПМ шумов S₁ = 10^{-17,4} 1/Гц, S₂ = 10^{-17,2} 1/Гц, S₃ = 10^{-18,1} 1/Гц.

СПМ фликкер-шума аппроксимируется выражением для СПМ цифрового делителя частоты [4]

$$S_{\text{флик}}(F) = 10^{-14,7} / F. \quad (9)$$

На рис. 4 приведены зависимости фазовых шумов всех составляющих входящих в выражение (1), а также общий суммарный фазовый шум для цифрового синтезатора табличного типа в соответствии с выражением (1). Расчеты проводились для синтезируемой частоты 5МГц и тактовой частоте 25МГц (рис.4, а) и 50 МГц (рис.4, б) при разрядности ЦАП равной 10.

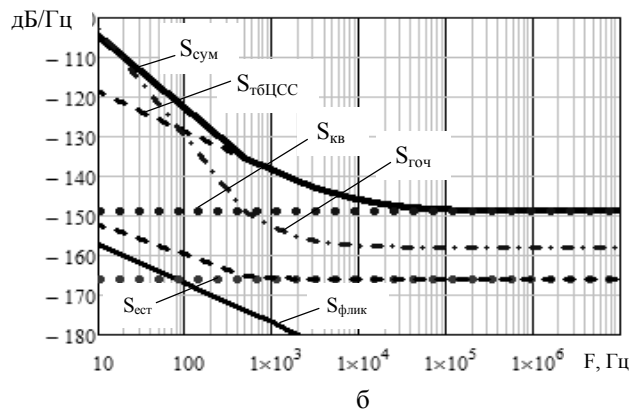
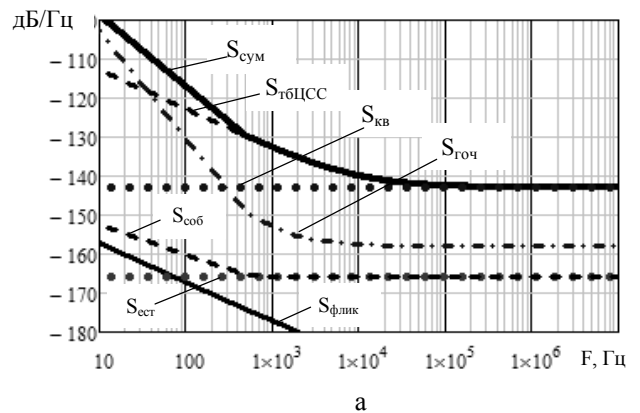


Рис. 4. СПМ суммарных фазовых шумов табличного ЦСС и его составляющих звеньев а – при f_T = 25 МГц; б – при f_T = 50 МГц

Из рис. 4 видно, что уровни собственных шумов ЦСС табличного типа при 10 разрядном ЦАП значительно меньше шумов квантования и составляют -167 дБ. Поэтому при расчетах общих шумов табличных ЦСС ими можно пренебречь и не учитывать при расчетах. Фазовые шумы источника тактового сигнала (ГОЧ), с учетом коэффициента передачи ЦСС, увеличивают суммарные шумы в низкочастотной области отстроек частоты F (до 0,5 кГц). Основную долю шумов составляют шумы квантования. При увеличении тактовой частоты в два раза шумы уменьшаются на -6 дБ (рис.3 и 4).

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

Выводы

Одним из важнейших параметров системы синтеза частот является уровень фазовых шумов. Для теоретического анализа уровня фазовых шумов разработаны и широко используются методики на основе моделей СПМ фазовых шумов функциональных звеньев радиоустройств.

Известные модели СПМ фазовых шумов ЦВС имеют невысокую точность, поэтому их применение весьма ограничено. В последнее время появились модели для расчета СПМ фазовых шумов ЦВС, использующие экспериментальные СПМ фазовых шумов для вычисления аппроксимирующих коэффициентов.

Таким образом, на основе уже известных методик и моделей СПМ фазовых шумов функциональных звеньев, разработана модель расчета СПМ фазовых шумов для синтезаторов табличного типа на дискретных элементах.

Преимущество этой модели заключается в том, что не имея экспериментальных зависимостей для вычисления аппроксимирующих коэффициентов k_i , можно с достаточной для практического применения точностью определить СПМ фазовых шумов для любых частот ЦСС табличного типа работающих на небольших тактовых частотах.

Список литературы

1. Кандырин Н.П. Методика проектирования и особенности управления параметрами частотно-модулированных сигналов в табличных цифровых синтезаторах / Н.П.Кандырин, А.М.Дзигора // Системы обработки информации. Збірник наукових праць. Вип. 3(19) – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2002. – С. 124-128.
2. Кандырин Н.П. Методика проектирования цифровых синтезаторов сигналов на основе программируемых логических интегральных схем / Н.П. Кандырин, А.М. Дзигора, А.И.Омельченко // Збірник наукових праць Об'єднаного науково-дослідного інституту Збройних Сил. – Х.: ОНДІ ЗС, 2005. – Вип. 2(2). – С. 131-141.
3. Кочемасов В. Цифровые вычислительные синтезаторы – современные решения / В. Кочемасов, Д. Скок, А. Черкашин // Электроника: – НТБ, 2014. – № 2. – С. 150-160.
4. Kroupa V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis / V.F. Kroupa. – 2003, John Wiley & Sons, Ltd. – ISBN: 0-470-84866-9 – 320 с.
5. Kroupa V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers / V.F.Kroupa. - John Wiley & Sons, Ltd, 1998. – 396 с.
6. 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.
7. 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.
8. Кандырин Н.П. Моделирование шумовых характеристик цифровых синтезаторов сигналов / Н.П.Кандырин // Системы обработки информации: збірник наукових праць. – Х.: ХВПС ім. І.Кожедуба, 2014. – Вип.. 4(120). - С. 7-10.
9. Кандирін Н.П. Собственные фазовые шумы цифровых вычислительных синтезаторов сигналов / Н.П. Кандырин // Системы озброєння і військова техніка. – 2014. – № 2(38). – С. 99-102.
10. Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis. 1999, Analog Devices, Inc.
11. Drucker Erik. Model PLL Dynamics and Phase Noise Performance / Erik Drucker. – Microwaves & RF, 2000. №2.

Поступила в редколлегию 1.12.2015

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

МОДЕЛЮВАННЯ ФАЗОВИХ ШУМІВ ЦИФРОВИХ СИНТЕЗАТОРІВ СИГНАЛІВ ТАБЛИЧНОГО ТИПУ

М.П. Кандирін

Проведено теоретичний аналіз і отримано вираз для розрахунку СЩП фазових шумів вихідного сигналу цифрового синтезатора табличного типу. Наведено результати моделювання шумових характеристик таких синтезаторів в порівнянні з синтезаторами обчислювального типу.

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

MODELING PHASE NOISE OF TABLE TYPE SIGNALSDIGITAL SYNTHESIZERS

N.P. Kandyrin

A theoretical analysis and an expression for calculating the PSD phase noise of the output signal of the digital synthesizer table type is obtained. The results of modeling the noise characteristics of these synthesizers in comparison with the synths computational type.

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