

УДК 621.396

Исследование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза

Якименко К.А.

В данной работе представлена обобщенная структурная схема гибридного синтезатора частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза. Разработана математическая модель спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов для представленной обобщенной структурной схемы гибридного синтезатора. Данная модель позволяет рассчитать уровень СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора для любых входных и выходных частот на всех частотах отстройки от несущей. Проведено моделирование СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора при использовании в качестве генератора опорной частоты (ГОЧ) кварцевого генератора и генератора с резонатором на поверхностно-акустических волнах (ПАВ). Определено, что основной вклад в общий уровень СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора на малых отстройках от несущей вносит ГОЧ. На больших отстройках основной вклад определяется как вкладом ГОЧ, так и вкладом цифрового вычислительного синтезатора (ЦВС). При формировании сетки частот от минимальной до максимальной диапазон изменения СПМ фазовых шумов ГСЧ с кварцевым ГОЧ меньше, чем для ГСЧ с ГОЧ на ПАВ резонаторе из-за разного вклада ЦВС.

Ключевые слова: прямой аналоговый синтезатор, ПАС, цифровой вычислительный синтезатор, ЦВС, гибридный синтезатор частот, фазовый шум.

Введение

Прямой аналоговый метод синтеза частот (Direct Analog Synthesis, DAS) – метод, при котором сетка выходных частот получается за счет умножения и/или деления, и/или смещения, и/или фильтрации опорного колебания [1,2]. Достоинствами прямых аналоговых синтезаторов (ПАС) являются: относительно невысокий уровень фазовых шумов и очень малое время перестройки. Однако расширение диапазона и уменьшение шага сетки формируемых частот требует усложнения структуры синтезатора. Это, наряду со значительными массогабаритными показателями, является существенным недостатком ПАС.

Данная проблема решается за счет включения в структуру ПАС формирователей сигналов, построенных по прямому цифровому методу синтеза, – цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС, Direct Digital Synthesizers, DDS). Цифровые вычислительные синтезаторы имеют малый шаг и малое время перестройки частоты, возможность цифрового управления и разные виды модуляции выходного сигнала [2,3]. Таким образом, ЦВС в структуре гибридного синтезатора частот (ГСЧ) на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза

обеспечивают малый шаг перестройки и широкий диапазон выходных частот при относительно несложной структуре и малых массогабаритных показателях.

Одна из основных характеристик выходного сигнала синтезаторов частот – спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов $S_{\phi}(F)$. Целью данной работы является математическое моделирование и исследование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза

Обобщенная структурная схема ГСЧ на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза

В настоящее время существует довольно много различных структур ГСЧ на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза, представленных, например, в [4,5]. В рамках данной работы будет проведено исследование шумовых характеристик упрощенного ГСЧ на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза, который содержит наиболее распространенные звенья. Структурная схема данного ГСЧ приведена на рис. 1.

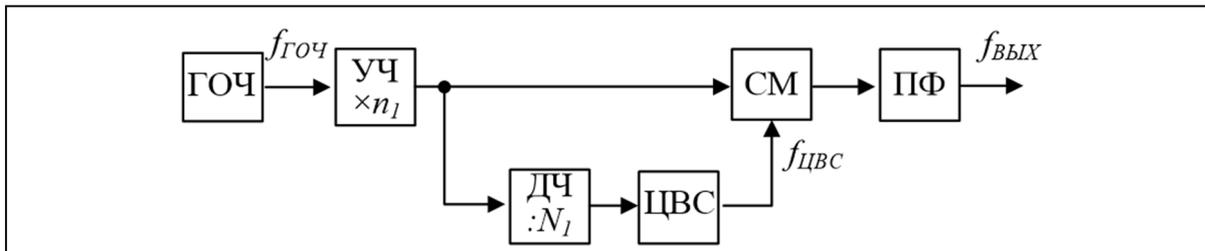


Рис. 1 Структурная схема ГСЧ на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза

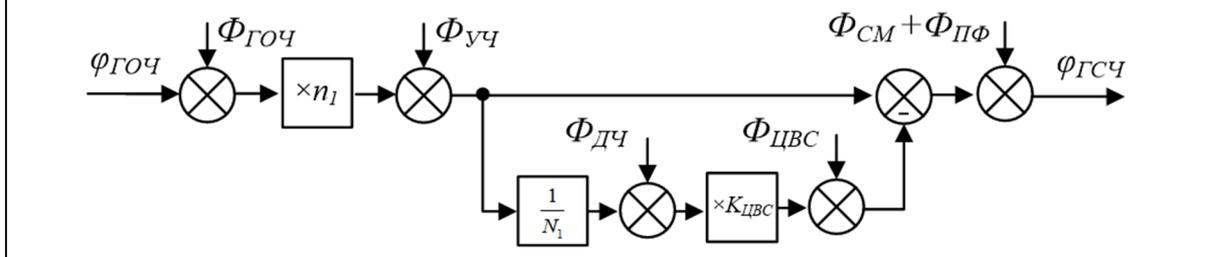


Рис. 2 Эквивалентная схема ГСЧ на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза со всеми источниками фазовых шумов

В схеме на рис. 1 применены следующие обозначения: ГОЧ – генератор опорной частоты; УЧ – умножитель частоты с коэффициентом умножения n_1 ; ДЧ – делитель частоты с коэффициентом деления N_1 ; ЦВС – цифровой вычислительный синтезатор; СМ – смеситель частот; ПФ – полосовой фильтр.

В качестве ГОЧ могут использоваться кварцевые генераторы, генераторы с резонатором на поверхностно-акустических волнах (ПАВ) и др.

ГОЧ формирует высокостабильный сигнал с частотой $f_{ГОЧ}$, который поступает на умножитель частоты, где умножается в n_1 раз. Выход умножителя подключен к одному из входов смесителя частот и, через ответвитель, к делителю частоты, в котором сигнал делится на N_1 и, далее, тактирует ЦВС. Выходной сигнал ЦВС с частотой $f_{ЦВС}$ поступает на второй вход смесителя. К выходу смесителя подключен полосовой фильтр, который выделяет суммарный сигнал, являющийся выходным сигналом гибридного синтезатора.

ЦВС формирует диапазон частот от $f_{ЦВСmin} = f_T / 2^M$ до $f_{ЦВСmax} = 0.4f_T$, где f_T – тактовая частота ЦВС, M – разрядность аккумулятора фазы ЦВС [3]. Шаг перестройки частоты ЦВС соответствует $\Delta f_{ЦВС} = f_T / 2^M$.

Представленный на рис.1 ГСЧ на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза формирует сетку выходных частот, ограниченных следующими значениями:

$$\begin{cases} f_{ГСЧ \min} = f_{ГОЧ} n_1 \left(\frac{1}{2^M N_1} + 1 \right); \\ f_{ГСЧ \max} = f_{ГОЧ} n_1 \left(\frac{0.4}{N_1} + 1 \right); \end{cases} \quad (1)$$

При этом шаг перестройки частоты равен шагу перестройки частоты ЦВС и составляет $\Delta f_{ГСЧ} = n_1 f_{ГОЧ} / 2^M$.

Разработка математической модели шумовых характеристик ГСЧ на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза

Спектральная плотность мощности фазовых шумов $S_\varphi(F)$ измеряется с помощью специальных анализаторов спектра. Результаты измерений показали, что $S_\varphi(F)$ математически можно представить в виде степенной модели $S_\varphi(F) = h_\alpha F^\alpha$, где постоянная h_α служит мерой уровня шума. Методика математического моделирования шумовых характеристик ЦВС и синтезаторов частот на основе систем фазовой автоподстройки частоты представлена в [1, 6-11].

Для разработки математической модели СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора на основе прямого аналогового и прямого цифрового метода синтеза составим эквивалентную схему, в которую включены все источники фазовых шумов, вносимых функциональными звеньями синтезатора (рис. 2).

В схеме на рис.2 применены следующие обозначения: $\varphi_{ГОЧ}$ – фаза сигнала ГОЧ; $\varphi_{ГСЧ}$ – фаза выходного сигнала ГСЧ. На схеме приведены шумы, вносимые функциональными звеньями синтезатора: $\Phi_{ГОЧ}$ – флуктуации фазы ГОЧ; $\Phi_{УЧ}$ – флуктуации фазы умножителя частоты с коэффициентом умножения n_1 ; $\Phi_{ДЧ}$ – флуктуации фазы делителя частоты с коэффициентом деления N_1 ; $\Phi_{ЦВС}$ – флуктуации фазы ЦВС с коэффициентом передачи $K_{ЦВС} = f_{ЦВС} / f_T$; $\Phi_{СМ} + \Phi_{ПФ}$ – флуктуации фазы смесителя и полосового фильтра.

На основе эквивалентной схемы (рис. 2) запишем выражение для фазовых флуктуаций выходного сигнала синтезатора:

$$\begin{aligned} \Phi_{ГСЧ} = & \Phi_{ГОЧ} \cdot n_1 + \Phi_{УЧ} + \\ & + \left[\frac{(\Phi_{ГОЧ} \cdot n_1 + \Phi_{УЧ})}{N_1} + \Phi_{ДЧ} \right] \cdot K_{ЦВС} + \\ & + \Phi_{ЦВС} + \Phi_{СМ} + \Phi_{ПФ}. \end{aligned} \quad (2)$$

По (2) получим математическую модель СПМ фазовых шумов ГСЧ на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза:

$$\begin{aligned} S_{ГСЧ}(F) = & S_{ГОЧ}(F) \cdot n_1^2 + S_{УЧ}(F) + \\ & + \left[\frac{(S_{ГОЧ}(F) \cdot n_1^2 + S_{УЧ}(F))}{N_1^2} + \right. \\ & + S_{ДЧ}(F) \left. \right] \cdot K_{ЦВС}^2 + S_{ЦВС}(F) + \\ & + S_{СМ}(F) + S_{ПФ}(F), \end{aligned} \quad (3)$$

где S_c индексами – математические модели соответствующих звеньев гибридного синтезатора.

Исследование шумовых характеристик ГСЧ на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза

Проведем моделирование СПМ фазовых шумов ГСЧ на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза по (3) при использовании в качестве ГОЧ кварцевого генератора и генератора с резонатором на ПАВ. Исходные данные для моделирования: выходная частота гибридного синтезатора $f_{ГСЧ} = 3100$ МГц, максимальная тактовая частота ЦВС $f_{Tmax} = 3500$ МГц.

В качестве модели СПМ фазовых шумов ГОЧ будем использовать усредненную математическую модель СПМ фазовых шумов генераторов [12]. После подстановки значений и небольшой коррекции коэффициентов аппроксимации модели СПМ фазовых шумов кварцевого генератора и генератора с резонатором на ПАВ имеют вид:

$$\begin{aligned} S_{ГОЧКВ}(F) = & \frac{10^{-9.431}}{F^3} + \frac{10^{-9.728}}{F^2} + \\ & + \frac{10^{-17.870}}{F} + 10^{-18.171}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} S_{ГОЧПАВ}(F) = & \frac{10^{-4.205}}{F^3} + \frac{10^{-7.986}}{F^2} + \\ & + \frac{10^{-13.447}}{F} + 10^{-17.225}. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученные модели полностью соответствуют шумовым характеристикам современного интегрального кварцевого генератора МОХО-100 [13] с выходной частотой $f_{ГОЧКВ} = 100$ МГц и интегрального генератора с резонатором на ПАВ LNO-1000 [14] с выходной частотой $f_{ГОЧПАВ} = 1000$ МГц. На рис. 3 представлены результаты сравнения экспериментальных СПМ фазовых шумов с теоретически рассчитанными по (4) и (5).

В качестве моделей СПМ фазовых шумов умножителя, делителя и смесителя частот использовались модели из [1]. Модель СПМ фазовых шумов ЦВС соответствует шумовым характеристикам ИМС AD9914 [11,12,15].

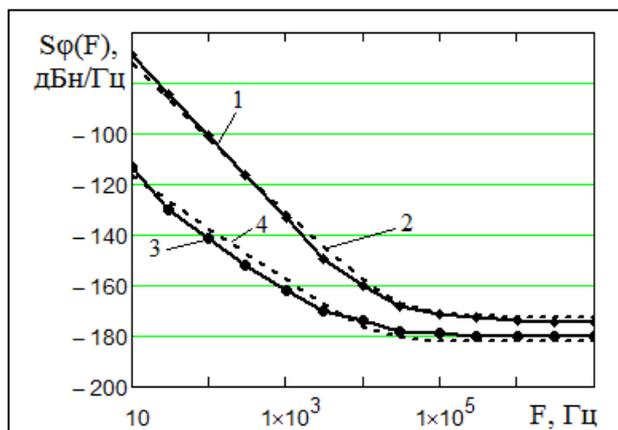


Рис. 3 СПМ фазовых шумов генератора с резонатором на ПАВ с выходной частотой $f_{ГОЧПАВ} = 1000 \text{ МГц}$ (1 – эксперимент, 2 – математическая модель) и кварцевого генератора с выходной частотой $f_{ГОЧКВ} = 100 \text{ МГц}$ (3 – эксперимент, 4 – математическая модель)

На рис.4 (а) представлены результаты моделирования СПМ фазовых шумов ГСЧ на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза с интегральным кварцевым ГОЧ. Выходная частота ГОЧ составляет 100 МГц , поэтому для достижения заданной выходной частоты ГСЧ $f_{ГСЧ} = 3100 \text{ МГц}$ необходимо использовать умножитель частоты с коэффициентом умножения $n_1 = 30$. Тактовая частота для ЦВС составляет $f_T = 3000 \text{ МГц}$, выходная частота ЦВС $f_{ЦВС} = 100 \text{ МГц}$. Цифрами на рис.4 (а) отмечены: 1 – общая СПМ фазовых шумов от частоты отстройки; 2 – вклад ГОЧ с кварцевым резонатором, приведенный с учетом коэффициен-

тов умножения и коэффициента передачи ЦВС; 3 – вклад ЦВС; 4 – вклад смесителя частот. Таким образом, для ГСЧ на основе прямого цифрового и прямого аналогового метода синтеза с применением ГОЧ на кварцевом резонаторе на частотах отстройки до 10 кГц основной вклад в общую СПМ фазовых шумов вносит ГОЧ, на частотах отстройки, превышающих 10 кГц вклад ГОЧ уже не является определяющим, но все равно он существенно превышает вклады ЦВС и смесителя частот.

На рисунке 4 (б) представлены результаты моделирования СПМ фазовых шумов ГСЧ на основе прямого цифрового и прямого аналогового методов синтеза с интегральным ГОЧ с резонатором на ПАВ. В данном случае выходная частота ГОЧ составляет 1000 МГц , поэтому выбираем значение коэффициента умножения $n_1 = 3$. Тактовая частота для ЦВС составляет $f_T = 3000 \text{ МГц}$, выходная частота ЦВС $f_{ЦВС} = 100 \text{ МГц}$. Цифрами на рисунке 4 (б) отмечены: 1 – общая СПМ фазовых шумов от частоты отстройки; 2 – вклад ГОЧ с резонатором на ПАВ, приведенный с учетом коэффициентов умножения и коэффициента передачи ЦВС; 3 – вклад ЦВС; 4 – вклад смесителя частот; По рисунку 4 (б) видно, что в ГСЧ на основе прямого цифрового и прямого аналогового метода синтеза с применением ГОЧ с резонатором на ПАВ на частотах отстройки до 20 кГц основной вклад в

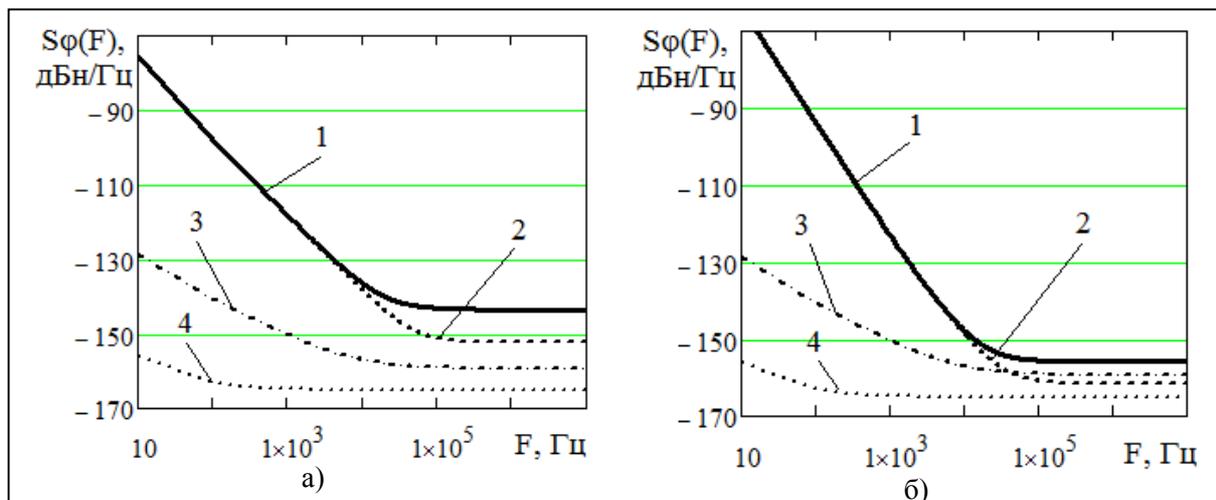


Рис. 4 Вклады звеньев в общую СПМ фазовых шумов ГСЧ на основе прямого цифрового и прямого аналогового методов синтеза с применением в качестве ГОЧ кварцевого генератора (а) и генератора с резонатором на ПАВ

общую СПМ фазовых шумов вносит ГОЧ, на больших частотах отстройки вклад ЦВС превышает вклад ГОЧ.

Минимальная и максимальная частота ГСЧ на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза определяются по (1). Для моделирования используем параметры микросхемы AD9914, максимальная тактовая частота для которой составляет $f_{Tmax} = 3500$ МГц и разрядность аккумулятора фазы $N = 32$. В нашем случае тактовая частота для ЦВС составляет 3000 МГц, следовательно, ГСЧ будет формировать диапазон частот от $f_{ГСЧmin} = 3000,00000067$ МГц до $f_{ГСЧmax} = 4200$ МГц. На рис. 5 представлены области изменения СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора с применением кварцевого ГОЧ (а) и ГОЧ с резонатором на ПАВ (б) при формировании минимальной выходной частоты ГСЧ $f_{ГСЧmin} = 3000,00000067$ МГц (кривая 1) и максимальной выходной частоте $f_{ГСЧmax} = 4200$ МГц (кривая 2).

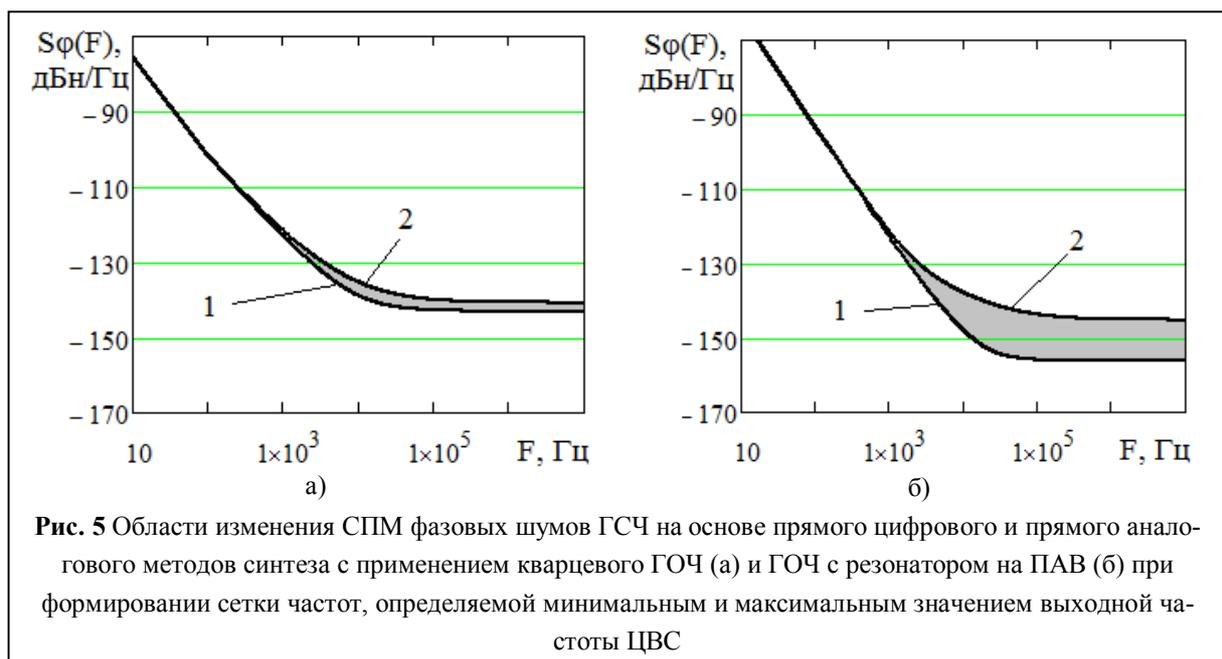
В соответствии с рис. 5 уровни СПМ фазовых шумов для ГСЧ на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза при формировании нижней и верхней частоты не изменяются на отстройках от несущей до 1 кГц. На отстройке больше 1 кГц диапазон изменения уровня СПМ фазовых шумов для ГСЧ с применением кварцевого ГОЧ составляет 2-3 дБн/Гц, диапазон

изменения уровня СПМ фазовых шумов для ГСЧ с применением ГОЧ с резонатором на ПАВ составляет 10-12 дБн/Гц. Такие разные диапазоны получаются из-за разного вклада ЦВС в общие СПМ фазовых шумов. У ГСЧ с применением кварцевого ГОЧ на этих отстройках частоты вклад ГОЧ в общую СПМ фазовых шумов больше, чем вклад ЦВС. У ГСЧ с ГОЧ с резонатором на ПАВ для данных отстроек вклад ЦВС превышает вклад ГОЧ.

Заключение

В рамках данной работы было проведено исследование шумовых характеристик гибридного синтезатора частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза. Была разработана математическая модель СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора, с помощью которой можно рассчитать уровень СПМ фазовых шумов для любых входных и выходных частот на любой частоте отстройки от несущей. Было проведено моделирование СПМ фазовых шумов ГСЧ с применением в качестве ГОЧ кварцевого генератора и генератора с резонатором на ПАВ. На основании результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

- Основной вклад в общий уровень СПМ фазовых шумов на малых отстройках от несущей вносит ГОЧ. На больших от-



стройках основной вклад определяется как вкладом ГОЧ, так и вкладом ЦВС.

- На одной и той же выходной частоте уровень СПМ фазовых шумов ГСЧ с ГОЧ с резонатором на ПАВ на подавляющем диапазоне отстроек от несущей меньше уровня СПМ фазовых шумов ГСЧ с кварцевым генератором за счет большей добротности ПАВ резонатора.

- При формировании сетки частот от минимальной до максимальной диапазон изменения СПМ фазовых шумов ГСЧ с кварцевым ГОЧ меньше, чем для ГСЧ с ГОЧ на ПАВ резонаторе из-за разного вклада ЦВС в общий уровень СПМ фазовых шумов.

Литература

1. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
2. Ямпурин, Н.П. Болознев В.В., Сафронов Е.В., Жалнин Е.Б. Формирование прецизионных частот и сигналов: Учеб. пособие. – Нижний Новгород: НГТУ, 2003. – 187 с.
3. Kroppa V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. John Wiley & Sons, Ltd. – 1998. – 396 с.
4. Патент США, Direct digital synthesizer/ direct analog synthesizer hybrid frequency synthesizer / Robert P. Gilmore; Qualcomm Incorporated. – № 5,128,623; Заявлено 10.09.1990; Опубл. 07.07.1992. – 14 с.
5. Кочемасов В.Н., Голубков А.В., Егоров Н.П., Черкашин А.А., Чугуй А.П. Цифровые вычислительные синтезаторы - применение в системах синтеза частот и сигналов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2014, № 8, с. 171-178.
6. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Докторов А.Н., Якименко К.А. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-00299 мол а.

Поступила 20 июня 2017г.

This paper presents a generalized block diagram of a hybrid frequency synthesizer based on direct analog synthesis and direct digital synthesis. The mathematical model of power spectral density (PSD) of phase noise is presented for a generalized structural scheme of the hybrid synthesizer. This model allows to calculate the level of PSD of phase noise of a hybrid synthesizer for any input and output frequencies and for all frequency detuning from the carrier. The simulation of PSD of phase noise of a hybrid synthesizer with the quartz oscillator and the oscillator with the surface-acoustic wave resonator (SAW) as the reference generator (REF) was performed. It is determined that the REF makes the main contribution to the overall level of PSD of phase noise of a hybrid synthesizer. At large delays the main contribution is determined as the contribution of the REF and the contribution of direct digital synthesizer (DDS).

Key words: direct analog synthesizer, DAS, direct digital synthesizer, DDS, hybrid frequency synthesizer, phase noise.

частот // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. №1. С. 5-20.

7. Romashov V.V., Yakimenko K.A. Modelling and comparing of phase noise curves of hybrid synthesizers // Proc. of the 2015 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). – Omsk State Technical University, Russia, Omsk, May 20–22, 2015. ISBN: 978-147997102-2. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147198.

8. Romashov, V.V., Khramov K.K., Yakimenko, K.A. The hybrid frequency synthesizer based on DDS and two-loop PLL // CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959400

9. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Якименко К.А. Исследование шумовых характеристик гибридного синтезатора частот на основе однокольцевой ИФАПЧ со смесителем и цифрового вычислительного синтезатора // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013, №4. С. 23-29.

10. Ромашов, В.В., Ромашова Л.В. Моделирование шумовых характеристик интегральных цифровых вычислительных синтезаторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2011. – №4. – С. 20-23.

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 // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2013. Krasnoyarsk, DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693574

12. Leeson D.B. A Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum // IEEE Proc. Letters. – February 1966. – Vol. 54. – С. 329-330.

13. Сайт компании МИКРАН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.micran.ru>.

14. Сайт компании Rakon Limited [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rakon.com/>.

15. Сайт компании Analog devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.analog.com/>.

Якименко Кирилл Александрович – аспирант кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: yakimenko.kirill@yandex.ru.

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