

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛЕЙ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИНТЕЗАТОРОВ КОМПАНИИ ANALOG DEVICES

Ромашов Владимир Викторович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники Муромского института ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».
E-mail: romashovmurom@mail.ru.

Ромашова Любовь Владимировна

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».
E-mail: romashovamurom@mail.ru.

Докторов Андрей Николаевич

инженер кафедры радиотехники Муромского института ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».
E-mail: doctorov_a_n@mail.ru.

Якименко Кирилл Александрович

аспирант кафедры радиотехники Муромского института ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».
E-mail: yakimenko.kirill@yandex.ru.
Адрес: 602264, Муром, ул. Орловская 23.

Аннотация: Проводится анализ результатов моделирования и экспериментальных измерений шумовых характеристик интегрального цифрового вычислительного синтезатора AD9910, в том числе и на образцах основной частоты. Исследования осуществляются при отключенном встроенном умножителе тактовой частоты на ФАПЧ. В экспериментах по измерению фазового шума цифрового вычислительного синтезатора используются малошумящий генератор SMA100A, анализатор сигналов и спектра FSUP8, отладочный модуль AD9910. Делается вывод о пригодности моделей математического моделирования спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов для практических расчетов шумовых характеристик формирователей радиосигналов.

Ключевые слова: цифровой вычислительный синтезатор, спектральная плотность мощности фазовых шумов, AD9910, образцы основной частоты, математическое моделирование.

Введение

В настоящее время широкое распространение получила технология прямого цифрового синтеза (DDS). Цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС), работа которых основана на данной технологии, входят в состав многих современных радиосистем [1, 2].

Использование DDS позволяет решить такие проблемы формирования сигналов, как увеличение скорости перестройки частоты, достижение малого шага перестройки частоты, снижения уровня фазовых шумов проектируемого синтезатора частот.

Важнейшим параметром синтезаторов частоты являются их шумовые характеристики, определяемые спектральной плотностью мощности (СПМ) фазовых шумов.

Измерение спектральной плотности мощности фазовых шумов возможно с помощью специальных приборов - измерителей фазовых шумов. Однако не всегда имеется такая возможность. Поэтому для описания шумовых характеристик ЦВС используются модели СПМ фазовых шумов [3, 4], которые позволяют существенно ускорить разработку и исследование различных радиоустройств [5]. Такие



Рис.1. Структурная схема интегрального ЦВС со встроенным умножителем тактовой частоты на ФАПЧ

модели основаны на использовании аппроксимации шумовых характеристик степенными функциями [6].

Главный недостаток интегральных ЦВС – малая выходная частота. Приоритетным направлением развития техники прямого синтеза частот является разработка новых цифровых вычислительных синтезаторов с все более высокой тактовой частотой. Для ее повышения при работе от низкочастотных кварцевых генераторов многие интегральные ЦВС имеют в своем составе встроенный умножитель тактовой частоты на системе ФАПЧ (PLL) (см. рис. 1). Но дальнейший рост тактовой частоты при использовании низкочастотных ГОЧ вызовет увеличение коэффициентов умножения, и, следовательно, приведет к росту шума в выходном сигнале [7].

Одним из способов повышения выходной частоты цифровых вычислительных синтезаторов может стать использование образов основной частоты. Данный метод позволяет без существенного повышения тактовой частоты увеличить частоту выходного сигнала. Известно, что спектр выходного сигнала ЦВС содержит основную частоту и ее образы – побочные высокочастотные составляющие, амплитуда которых спадает с ростом частоты по закону функции синус Котельникова. Если использовать полосовой фильтр и выделить нужный образ, то можно повысить общую выходную частоту формирователя сигналов [8]. Однако, для таких формирователей частотное планирование является сложным процессом [9].

Математическая модель цифрового вычислительного синтезатора, работающего на образцах основной частоты, описана в [10].

Применение ЦВС на образцах основной частоты в составе сложных формирователей сигналов – гибридных синтезаторов подробно рассмотрено в [11 - 14]. Также в [15] показано применение цифровых вычислительных синтезаторов в формирователях

сигналов с умножителями частоты на транзисторах.

Наиболее подробно все случаи применения ЦВС, как на основной частоте, так и на образцах, в составе сложных систем формирования сигналов, с математическими моделями спектральной плотности мощности фазовых шумов приведены в обзоре [16].

В данной статье речь пойдет о сравнительном анализе математических моделей СПМ фазовых шумов интегрального цифрового вычислительного синтезатора AD9910, как для основной частоты, так и для ее образов, с результатами экспериментального исследования шумовых характеристик с помощью прибора R&S@FSUP8 Signal Source Analyzer. Встроенный умножитель тактовой частоты на системе ФАПЧ был отключен.

Моделирование шумовых характеристик ЦВС

Для анализа шумовых свойств цифровых вычислительных синтезаторов воспользуемся математической моделью спектральной плотности мощности собственных фазовых шумов ЦВС на основной частоте выходного сигнала, предложенной в [3]:

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

где $K_{\text{ЦВС}} = f_{\text{ЦВС}}/f_T$ – коэффициент деления DDS; f_T – тактовая частота DDS; $f_{\text{ЦВС}}$ – основная частота ЦВС; коэффициенты аппроксимации k_1, k_2, k_3, k_4 определяют $1/F^2$ шум, $1/F$ шум, тепловой шум цифро-аналогового преобразователя, тепловой шум нагрузки соответственно; $S_{\text{кв}} = 2^{-2N-0,59} (f_{\text{ЦВС}}/f_T^2)$ – шум квантования

ЦАП; F – отстройка частоты; N – разрядность ЦАП.

Коэффициенты аппроксимации были найдены по методу, описанному в [6]: $k_1 = -9,2$; $k_2 = -8,4$; $k_3 = -16,8$; $k_4 = -14,5$.

Известно, что выходной сигнал ЦВС является суммой основной частоты $f_{ЦВС}$ и спектральных компонент (образов), частоты которых можно записать для положительного или отрицательного образа числами $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ [8, 9, 17]:

$$f_{обр\ n} = |n| f_T + \text{sgn}(n) f_{ЦВС},$$

где $\text{sgn}(n)$ – знак n .

Моделирование шумовых характеристик ЦВС на образах основной частоты осуществляется с использованием модели СПМ фазовых шумов [17]:

$$S_{ЦВС\ обр} (F) = \left(\frac{f_{ЦВС}}{f_T} \right)^2 \left(\frac{10^{k_2}}{F^2} + \frac{10^{k_1}}{F} + 10^{k_4} \right) + \left(10^{k_3} + 2^{-2N-0.59} \left(\frac{f_{ЦВС}}{f_T} \right) \right) \left(\frac{\pi f_{обр\ n} / f_T}{\sin(\pi f_{обр\ n} / f_T)} \right)^2. \quad (2)$$

Математическая модель СПМ фазовых шумов ЦВС на основной частоте [3-5] с учетом шумов генератора опорной частоты:

$$S_{ЦВС_out} (F) = K_{ЦВС}^2 S_{ГОЧ} (F) + S_{ЦВС} (F), \quad (3)$$

где $S_{ГОЧ} (F)$ – СПМ фазовых шумов генератора опорной частоты (ГОЧ).

Для образов основной частоты аналогичная математическая модель СПМ фазовых шумов [17]

$$S_{ЦВСобр_out} (F) = (n + K_{ЦВС})^2 S_{ГОЧ} (F) + S_{ЦВСобр} (F). \quad (4)$$

Шумовые характеристики ЦВС на основной частоте

На рис. 2-4 приведены результаты моделирования СПМ фазовых шумов цифрового вычислительного синтезатора AD9910 по формулам (1), (3) и сравнение с результатами измерений СПМ DDS AD9910 при $K_{DDS} = 0,25$, тактовых частотах 100, 300, 900 МГц.

Для учета собственных шумов генератора опорной частоты были получены экспериментальные шумовые характеристики генератора опорной частоты SMA100A для трех частот 100, 300, 900 МГц. На рис. 5 приведена СПМ фазовых шумов такого генератора для частоты 100 МГц. В дальнейшем на основе измеренных шумовых характеристик получены модели СПМ фазовых шумов генератора SMA100A на различных выходных частотах. Как видно, уровень шума генератора меньше шумов ЦВС.

По рис. 2-4 видно, что результаты эксперимента в целом хорошо совпадают с результатами моделирования.

Шумовые характеристики ЦВС на образах основной частоты

Основная частота f_{out} (при $n = 0$) ЦВС выделяется с помощью ФНЧ. Для выделения сигналов с частотами образов используются полосовые фильтры. Для лучшей фильтрации $K_{ЦВС}$ ограничен диапазоном значений $K_{ЦВС} \in [K_{ЦВС\min}; K_{ЦВС\max}]$. На практике $K_{ЦВС\min} \approx 0,15$, $K_{ЦВС\max} \approx 0,35$. Поэтому для проведения измерений и моделирования $K_{ЦВС}$ был выбран равным 0,25.

На рис. 6 показаны результаты измерения и моделирования СПМ фазовых шумов ЦВС при использовании первого отрицательного образа $n = -1$ для тактовой частоты 100 МГц, которые совпадают с точностью 4 дБ, достаточной для практических расчетов.

Для других образов основной частоты аналогичные измерения и сравнения приведены на рис. 7 при тактовой частоте 100 МГц. На рис. 8 показаны аналогичные шумовые характеристики для $n = 0, -1$ при тактовой частоте 300 МГц.

На рис. 7 и 8 можно заметить, что с увеличением номера образа СПМ фазовых шумов увеличивается как для результатов эксперимента, так и для результатов математического моделирования. Кроме того, видно, что для образов основной частоты результаты эксперимента и моделирования совпадают, но име-

ется погрешность моделирования, на отдельных отстройках частоты достигающая 4-5 дБн/Гц. Данный факт позволяет сделать вывод о том, что исследуемый метод моделирования

может применяться в практических исследованиях, инженерных и конструкторских расчетах, при выборе оптимальной с точки зрения уровня фазовых шумов структуре формирова-

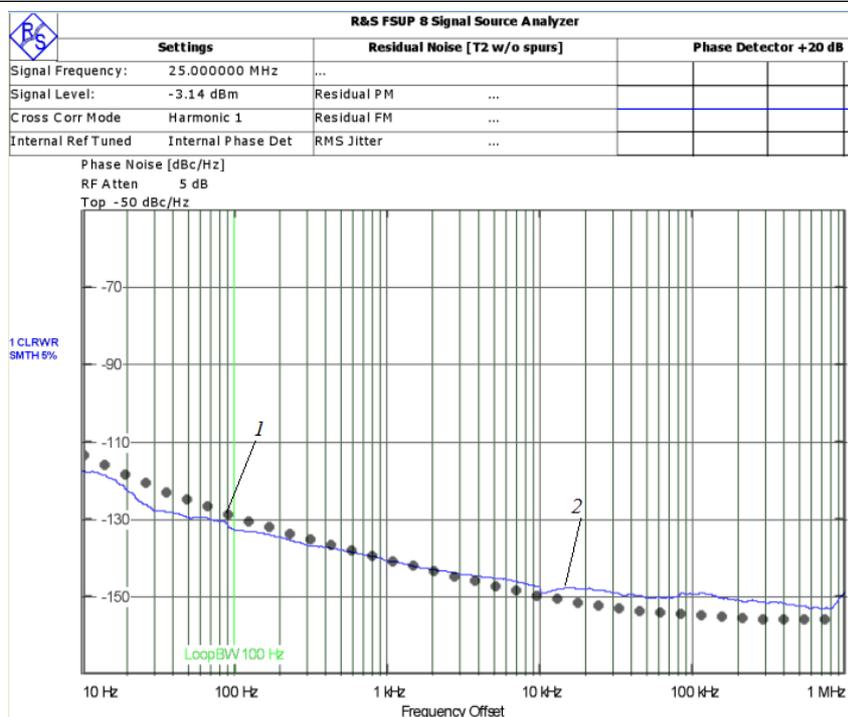


Рис.2. СПМ фазовых шумов DDS AD9910 на основной частоте 25 МГц при тактовой частоте 100 МГц: 1 – моделирование, 2 – эксперимент

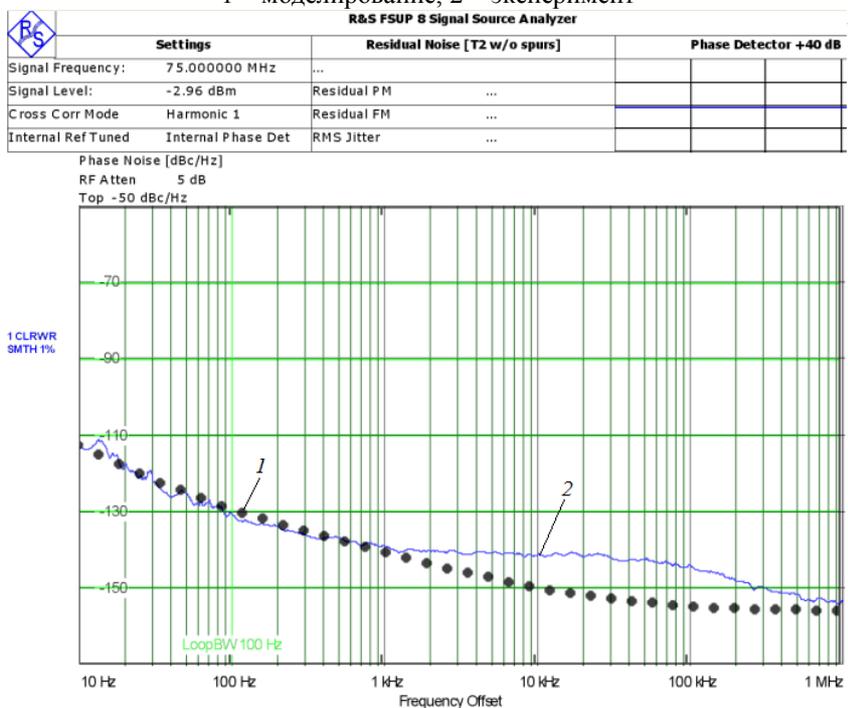


Рис.3. СПМ фазовых шумов DDS AD9910 на основной частоте 75 МГц при тактовой частоте 300 МГц: 1 – моделирование, 2 – эксперимент

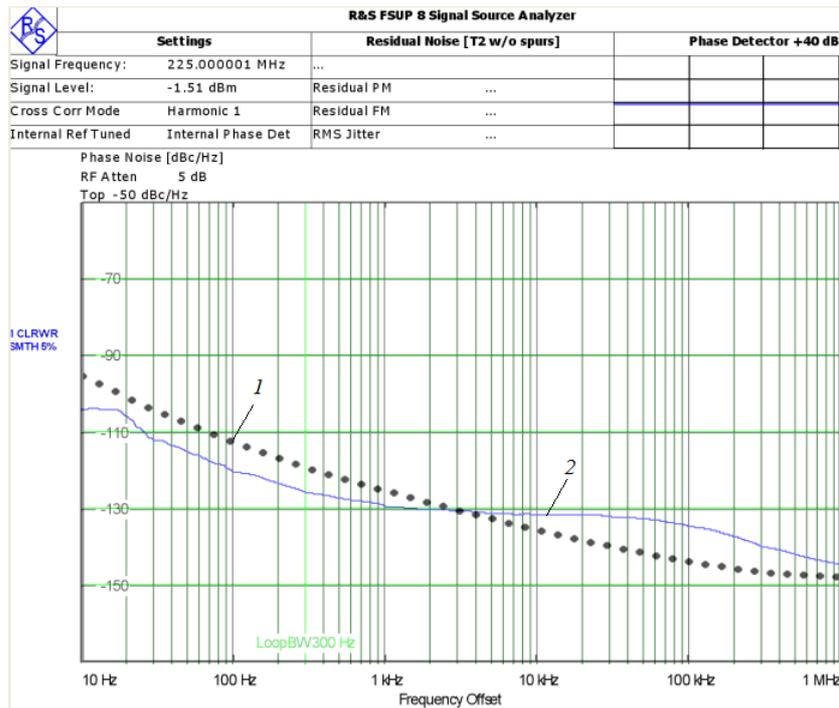


Рис.4. СПМ фазовых шумов DDS AD9910 на основной частоте 225 МГц при тактовой 900 МГц:
1 – моделирование, 2 – эксперимент

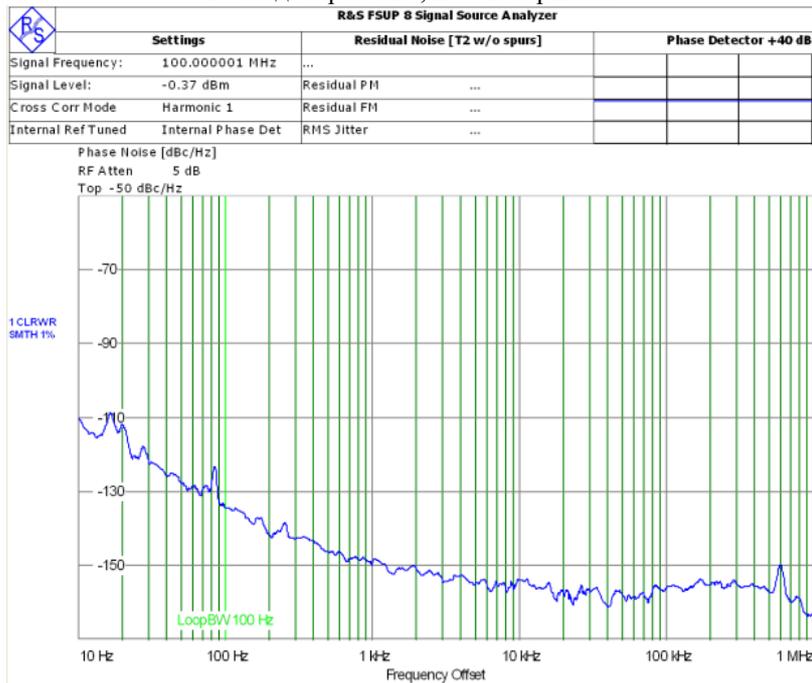


Рис.5. СПМ фазовых шумов ГОЧ SMA100A на частоте 100 МГц

теля сигналов.

Дальнейшие исследования будут направлены на повышение точности моделирования и снижения общей погрешности.

Заключение

Таким образом, в ходе данного исследования были получены следующие результаты:

1. Проведено моделирование и экспериментальное измерение спектральной плотности мощности фазовых шумов ЦВС как на основ-

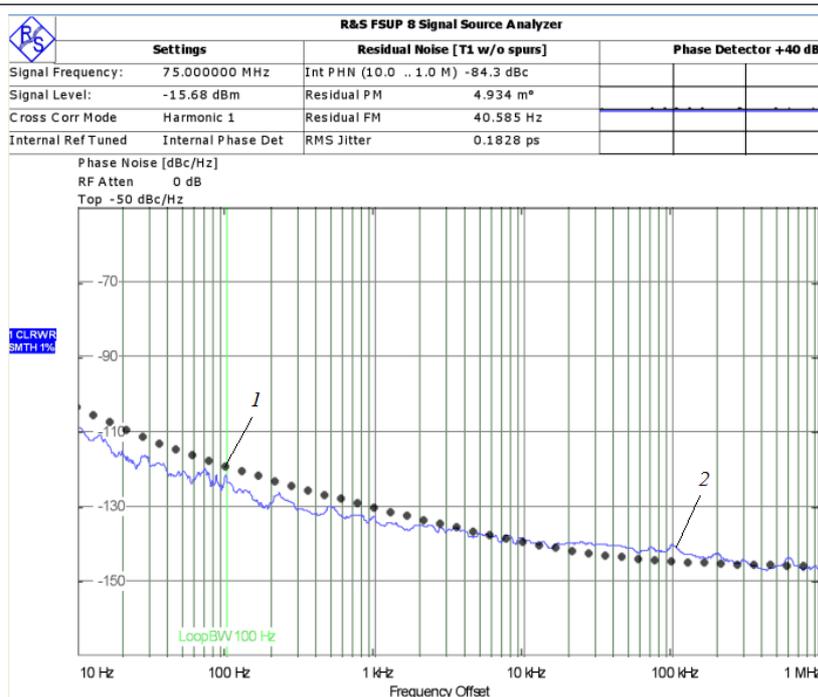


Рис. 6. СПМ фазовых шумов ЦВС AD9910 на образе $n = -1$ с частотой 75 МГц при тактовой 100 МГц: 1 – моделирование, 2 – эксперимент

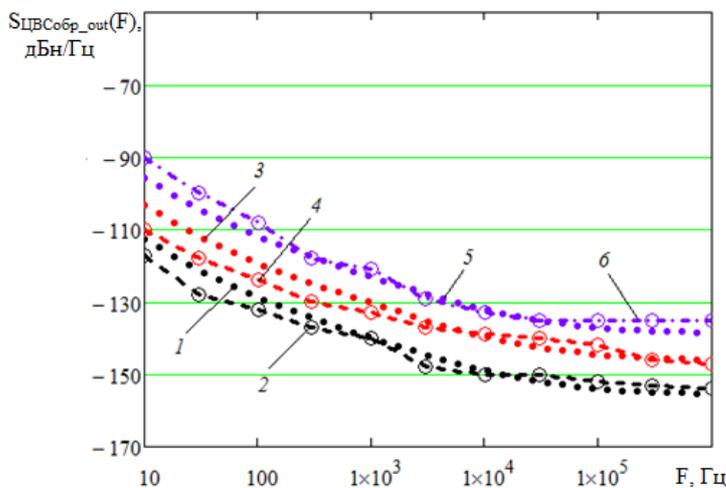


Рис.7. СПМ фазовых шумов ЦВС AD9910 на образцах при тактовой 100 МГц, $n = 0$: 1 – моделирование, 2 – эксперимент; $n = -1$: 3 – моделирование, 4 – эксперимент; $n = -2$: 5 – моделирование, 6 – эксперимент

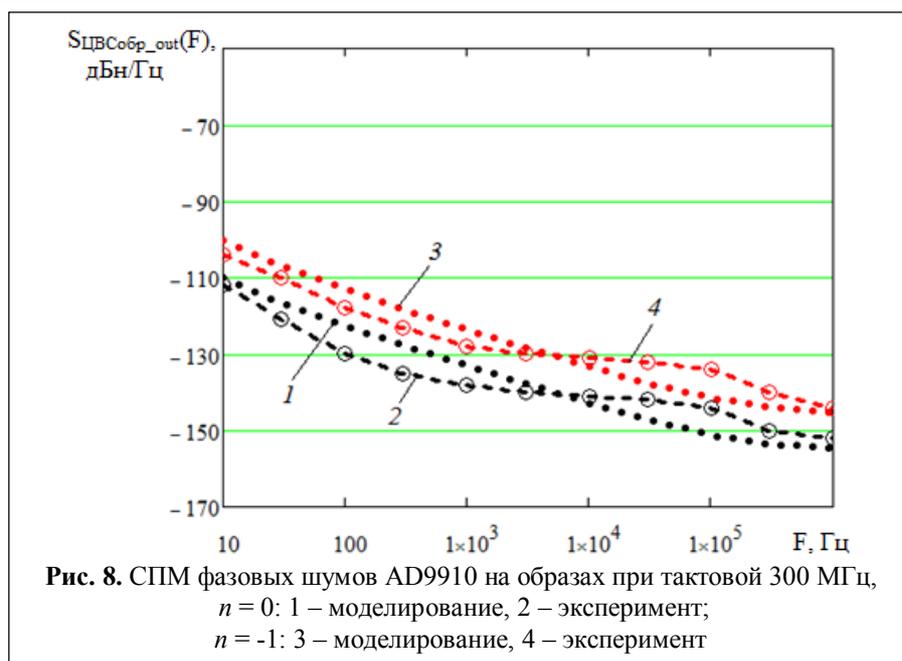
ной частоте, так и на образцах основной частоты.

2. По результатам проведенных экспериментов уточнена математическая модель СПМ фазовых шумов на образцах основной частоты. Также были подтверждены значения коэффициентов аппроксимации модели шумовых характеристик для DDS AD9910 $k_1 = -9,2$; $k_2 = -8,4$; $k_3 = -16,8$; $k_4 = -14$.

3. Сравнение результатов моделирования и эксперимента подтвердило, что предложенные модели СПМ фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов на основной частоте и образцах обладают точностью, достаточной для практических исследований и инженерных расчетов.

Литература

1. Analog Devices, Inc., 2016. Available: <http://www.analog.com>



2. Kroupa V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis. 2003, John Wiley & Sons, Ltd. – 320 p.

3. 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.

4. 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.

5. Romashov V.V., Khramov K.K. The Comparative Analysis of the Noise Curves of the Signal Shapers based on Direct Digital Synthesizer in Proc. of the 2015 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). – Omsk State Technical University. Russia, Omsk, Mai 20–22, 2015. ISBN: 978-147997102-2. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147196

6. Ромашов В.В., Ромашова Л.В. Методика расчета коэффициентов аппроксимации спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012, №1. С. 23-26.

7. Romashov V.V., Romashova L.V., Doktorov A.N. The mathematical model of noise characteristics of a direct digital synthesizer with the built-in multiplier of clock frequency on PLL in Proc. of the 2015 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). – Omsk State Technical University. Russia,

Omsk, Mai 20–22, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147197

8. Romashov V.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. The use of images of DDS fundamental frequency for high-frequency signals formation in 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo 2014. Pp.310-311. Category number CFP14788-CDR; Code 109221. (DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959408).

9. Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Частотное планирование формирователей сигналов радиосистем на основе цифровых вычислительных

синтезаторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012, № 4. С. 10-15.

10. Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Модель цифрового вычислительного синтезатора, работающего на образе основной частоты // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012, №2. С. 13-17.

11. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A. The use of images of DDS in the hybrid frequency synthesizers in 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo 2014. Pp.302-303. Category number CFP14788-CDR; Code 109221. (DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959404)

12. 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, Mai 20–22, 2015. ISBN: 978-147997102-2. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147198

13. Romashov V.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A. The hybrid frequency synthesizer based on DDS and two-loop PLL 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo 2014. Pp.294-295. Category number CFP14788-CDR; Code 109221. (DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959400).

14. Romashova L.V., Romashov A.V., Fomichyov A.N. Research of Noise Characteristics of Hybrid Frequency Synthesizers on the Basis of Direct Digital Synthesizers and PLL Systems // Proc. of the 2011 IEEE International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2011, Krasnoyarsk, Russia, September 15-16, 2011. – IEEE. - Pp. 113-115.

15. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К. Исследование шумовых характеристик формирователя сигналов на основе ЦВС и умножителей частоты на транзисторах // Радиопромышленность. 2012, №2. С. 31-37.

16. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Докторов А.Н., Якименко К.А. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезато-

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

17. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Модель спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов на образах основной частоты // Радиопромышленность. 2012, №2. С. 38-48.

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

Поступила 13 мая 2016 г.

English

Experimental test of model noise characteristics of Analog Devices Co. integral digital computing synthesizers

Vladimir Viktorovich Romashov – Doctor of Engineering, Professor Head of Radio Engineering Department Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs.

E-mail: romashovmurom@mail.ru.

Lyubov Vladimirovna Romashova – Candidate of Technical Sciences Associate Professor Radio Engineering Department Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs.

E-mail: romashovamurom@mail.ru.

Andrey Nikolaevich Doctorov – Engineer of Radio Engineering Department Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs.

E-mail: doctorov_a_n@mail.ru.

Kirill Aleksandrovich Yakimenko – Post-graduate student of Radio Engineering Department Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs.

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

Address: 602264, Murom, Orlovskaya 23.

Abstract: This work is dedicated to the experimental study of noise characteristics in integral digital computing synthesizers (DCS) based on the direct digital synthesis principle. AD9914 DCS block skeleton diagram with built-in clock frequency multiplier as PLL system is examined. The main shortcoming of such synthesizers is low output frequency up to 1500 MHz. Output frequency enhancement in today's DCS-based radio signal shaping systems is done through transistor multipliers and complex multi-loop PLL systems. One of the ways to enhance DCS output frequency is using their base frequency images which are the digital synthesis by-product. Experimental research and modeling technique is used to measure phase noise power spectral density as the main frequency synthesizer characteristic. Detailed comparative analysis is carried out concerning results of experimental measurements and noise characteristic modeling and based on base frequency images of AD9910 integral digital computing synthesizer as well. Research is performed with the switched-off built-in PLL clock multiplier. SMA100A low-noise generator, FSUP8 signal spectrum analyzer, AD9910 debug module are used in experiments to measure digital computing synthesizer phase noise.

The conclusion is drawn about good compliance of mathematical models of phase noise power spectral density in digital computing synthesizers with experiment results and their applicability for practical calculations of PLL-based radio signal shaper noise characteristics.

Key words: digital computing synthesizer, phase power noise spectral density, AD9910, base frequency images, mathematical modeling.

References

1. Analog Devices, Inc., 2016. Available: <<http://www.analog.com>>
2. Kroupa V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis. 2003, John Wiley & Sons, Ltd. - 320 p.

3. 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.
4. 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.
5. Romashov V.V., Khramov K.K. The Comparative Analysis of the Noise Curves of the Signal Shapers based on Direct Digital Synthesizer in Proc. of the 2015 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). - Omsk State Technical University. Russia, Omsk, Mai 20-22, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147196.
6. Romashov V.V., Romashova L.V. Approximation ratio calculation methods of phase noise power spectral density in digital computing synthesizers. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. 2012, No. 1. P. 23-26.
7. Romashov V.V., Romashova L.V., Doktorov A.N. The mathematical model of noise characteristics of a direct digital synthesizer with the built-in multiplier of clock frequency on PLL in Proc. of the 2015 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). - Omsk State Technical University. Russia, Omsk, Mai 20-22, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147197
8. Romashov V.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. The use of images of DDS fundamental frequency for high-frequency signals formation in 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo 2014. Pp.310-311. Category number CFP14788-CDR; Code 109221. (DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959408).
9. Romashov V.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. Frequency planning of shapers of signals of radio systems on the basis of digital computing synthesizers. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. 2012, No. 4. Page 10-15.
10. Romashov V.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. Digital computing synthesizer model with base frequency image operation. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. 2012, No. 2. P. 13-17.
11. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A. The use of images of DDS in the hybrid frequency synthesizers in 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo 2014. Pp.302-303. Category number CFP14788-CDR; Code 109221. (DOI: 10.1109/ CRMICO.2014.6959404)
12. 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, Mai 20-22, 2015. ISBN: 978-147997102-2. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147198
13. Romashov V.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A. The hybrid frequency synthesizer based on DDS and two-loop PLL 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo 2014. Pp.294-295. Category number CFP14788-CDR; Code 109221. (DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959400).
14. Romashova L.V., Romashov A.V., Fomichyov A.N. Research of Noise Characteristics of Hybrid Frequency Synthesizers on the Basis of Direct Digital Synthesizers and PLL Systems//Proc. of the 2011 IEEE International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2011, Krasnoyarsk, Russia, September 15-16, 2011. - IEEE. - Pp. 113-115.
15. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K. Research of Noise Characteristics of DCS-based signal shaper and of transistor-based frequency multipliers // Radiopromyshlennost. 2012, No. 2. P. 31-37.
16. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Doktorov A.N., Yakimenko K.A. Noise characteristic modeling in hybrid frequency synthesizers. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy adio engineering and telecommunication systems, 2014, No. 1, p. 5-20.
17. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. Model of phase noise power spectral density of digital computing synthesizers with base frequency images. - the Radio industry. 2012, No. 2. P. 38-48.