

### Регрессионная модель спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов

Одной из основных технических характеристик, определяющей качество цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС) является спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов  $S_{\phi}(F)$ , которая характеризуется отношением мощности шумов на частоте  $F$  одной боковой полосы в полосе частот 1 Гц к мощности сигнала.

Для представления спектральных плотностей мощностей фазовых флуктуаций ЦВС предложена модель [1], основанная на степенных функциях вида

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

где коэффициенты  $k_1, k_2, k_3, k_4$  определяют уровень СПМ  $1/F^2$  шума,  $1/F$  шума, естественной (аддитивной) 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,  $f_{\text{out}}$  и  $f_T$  - выходная и тактовая частоты ЦВС,

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

Для  $N \leq 10$  шумы квантования преобладают над аддитивными шумами. У современных интегральных ЦВС  $N = 14$ , поэтому шумы квантования для них можно не учитывать.

В [2] предложен алгоритм определения коэффициентов СПМ фазовых шумов  $k_i$  по экспериментальным шумовым характеристикам, приводимым в данных ЦВС, количество которых очень ограничено. При этом коэффициент  $k_3$  определяет аддитивный уровень шума при максимальной расстройке (обычно  $F=1$  МГц) и рассчитывается для минимальной частоты ЦВС (желательно  $K_{\text{ЦВСmin}} \leq 0,02$ ), когда составляющая  $10^{k_4} K_{\text{ЦВСmin}}^2$  будет существенно меньше собственных аддитивных шумов ЦВС, определяемых составляющей  $10^{k_3}$ . Например, для AD9911 при  $K_{\text{ЦВСmin}} = 0,02$  минимальный уровень шума составляет  $10^{-16,8}$  и  $k_3 = -16,8$ . При этом погрешность модели СПМ невелика.

Если  $K_{\text{ЦВСmin}} \geq 0,02$ , расчет коэффициента  $k_3 = \lg \left( 10^{S_{\text{дБ}}(F, f_{\text{out min}})/10} - 2^{-2N-0,59} \frac{f_{\text{out min}}}{f_T^2} \right)$  для

некоторых микросхем оказывается невозможным (получается логарифм отрицательного числа) и приходится выбирать его с погрешностью.

Предлагается воспользоваться моделью СПМ фазовых шумов на основе регрессии выборки данных линейной комбинацией функций вида  $\sum_{i=0}^2 C_i F^{-i}$ . При этом задается по точкам СПМ

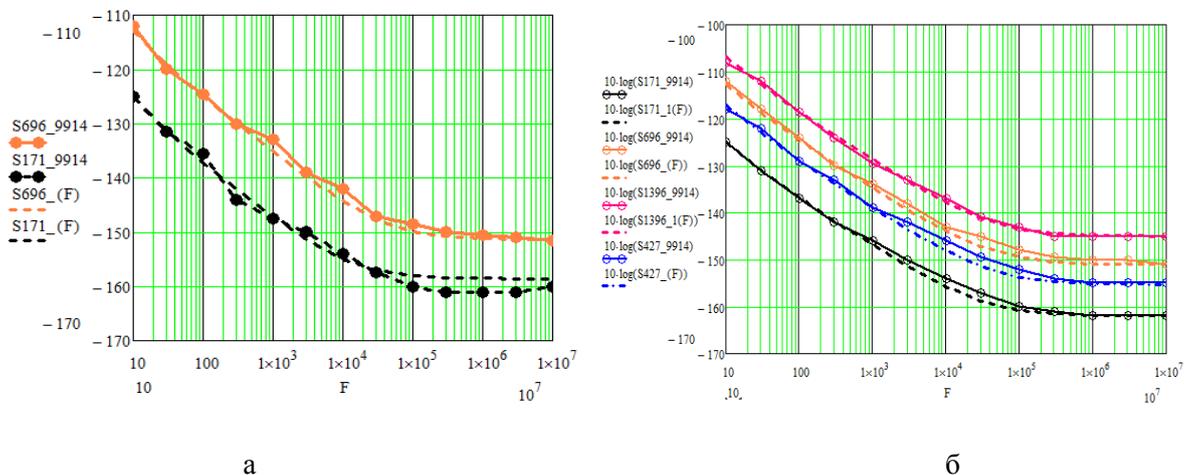
фазовых шумов при низкой выходной частоте ЦВС и с помощью, например, программы Маткад вычисляются коэффициенты  $C_i$ . Далее по формулам вычисляются коэффициенты  $k_1 = \lg C_1$ ,  $k_2 = \lg C_2$ . Коэффициенты  $k_3$  и  $k_4$  определяются из уравнения  $10^{k_4} (K_{\text{ЦВС}})^2 + 10^{k_3} = 10^{C_0}$ .

Для их нахождения составляется системы уравнений с использованием значений экспериментальных СПМ фазовых шумов при максимальной отстройке для различных выходных частот ЦВС  $f_{\text{out1}}$  и  $f_{\text{out2}}$

$$\begin{aligned} 10^{k_4} (K_{\text{ЦВС1}}) + 10^{k_3} &= 10^{S_{\text{дБ}}(F, f_{\text{out1}})/10} \\ 10^{k_4} (K_{\text{ЦВС2}}) + 10^{k_3} &= 10^{S_{\text{дБ}}(F, f_{\text{out2}})/10} \end{aligned}$$

## Секция 2. Анализ сигналов и систем

Для ЦВС AD9914 таким образом определены коэффициенты  $k_1 = -9,08$ ,  $k_2 = -8,3$ ,  $k_3 = -16,8$ ,  $k_4 = -13,7$  (для сравнения полученные ранее в [3, 4] коэффициенты равны  $k_1 = -9,1$ ;  $k_2 = -8,2$ ;  $k_3 = -16,0$ ;  $k_4 = -13,8$ ). Рассчитанные шумовые характеристики с использованием полученной модели и сравнение их с экспериментальными приведены на рис. 1 б, на рис. 1 а – данные из [3]. Как видно, погрешность модели, особенно на невысоких выходных частотах ЦВС, уменьшилась почти на 5 дБ/Гц.



**Рис. 1.** СПМ фазовых шумов ЦВС AD9914 (пунктир – рассчитанные, сплошные с кружочками – экспериментальные): а – по старой модели, б – по новой модели

Таким образом, предложенная уточненная методика расчета коэффициентов аппроксимации СПМ фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов позволила существенно повысить точность модели.

### Литература

1. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K. Research of Phase Noise of Direct Digital Synthesizers // Proc. of the 2011 IEEE International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2011, Krasnoyarsk, Russia, September 15-16, 2011. – IEEE. - Pp. 168-171.
2. 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.
3. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Моделирование шумовых характеристик новых интегральных цифровых вычислительных синтезаторов компании Analog Devices // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013, №2. С. 26 – 32.
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 // Proc. of the 2013 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1.