

Ромашов В.В., Ромашова Л.В.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
E-mail: romashovmurot@mail.ru*

### Модель шумовых характеристик генераторов сигналов

Для теоретического анализа шумовых характеристик радиоустройств используют модели спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов на основе степенных функций. Такие модели известны и используются для всех основных функциональных узлов радиосистем, например, для генераторов, детекторов, умножителей частоты и других звеньев. Их применение существенно упрощает анализ и проектирование устройств синтеза частот, формирователей сигналов и других устройств, позволяя обойтись без сложных экспериментальных исследований.

Важным моментом в применении моделей является их достаточная точность для прогнозирования шумовых характеристик устройств синтеза и формирования сигналов. Особенно важной является задача получения точных математических моделей шумовых характеристик для конкретных типов генераторов сигналов, реализованных на определенной элементной базе или по какой-либо схеме, так как результирующий уровень фазовых шумов всего устройства синтезирования или формирования сигналов определяется именно характеристиками генераторов. Однако все известные математические модели СПМ фазовых шумов устройств являются усредненными и для реальных генераторов могут существенно отличаться от их шумовых характеристик. Поэтому задача разработки математических моделей шумовых характеристик на основе экспериментальных зависимостей используемых генераторов сигналов является актуальной задачей.

В [1] приводится основополагающая модель СПМ фазовых шумов генераторов:

$$S(F) = \frac{G \cdot K_{ш} \cdot k \cdot T}{2 \cdot P} \left[ \frac{f_c}{F^3} \cdot \left( \frac{f_0}{2 \cdot Q} \right)^2 + \frac{1}{F^2} \cdot \left( \frac{f_0}{2 \cdot Q} \right)^2 + \frac{f_c}{F} + 1 \right], \quad (1)$$

где  $G$  – коэффициент усиления транзистора;  $K_{ш}$  – коэффициент шума транзистора;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $P$  – высокочастотная мощность, передаваемая в резонатор;  $Q$  – добротность нагруженного резонатора;  $f_0$  – частота генератора;  $f_c$  – граничная частота области преобладания фликкер-шума в спектре шума транзистора;  $F$  – отстройка частоты от  $f_0$ .

Данная формула позволяет рассчитать СПМ фазовых шумов генераторов, управляемых напряжением ГУН, на варакторных управителях частоты, а также ЖИГ.

В [2-4] приводятся формулы для шумовых характеристик генераторов, управляемых напряжением ГУН и генераторов опорной частоты, которые отличаются коэффициентами и получены для различных частот.

В общем виде модель СПМ фазовых шумов генераторов удобно представить в виде:

$$S(F) = \frac{10^{k_4}}{F^4} + \frac{10^{k_3}}{F^3} + \frac{10^{k_2}}{F^2} + \frac{10^{k_1}}{F^1} + 10^{k_0} \quad (2)$$

Для определения коэффициентов модели для конкретного типа генератора по имеющимся экспериментальным шумовым характеристикам воспользуемся моделью СПМ фазовых шумов на основе регрессии выборки данных линейной комбинацией функций вида

$$g(F) = \sum_{i=0}^4 C_i F^{-i}, \quad \text{где } C_i = 10^{k_i}.$$

При этом по точкам экспериментальной характеристики СПМ фазовых шумов с помощью, например, программы Маткад можно определить коэффициенты  $C_i$  с помощью линейной комбинации функций пользователя, осуществляющей регрессию данных.

Однако диапазон изменений значений СПМ фазовых шумов у генераторов составляет 90 – 100 дБ/Гц. Поэтому получаемая в программе матрица коэффициентов является плохо обусловленной ввиду большого количества линейного сочетания функций, локализацией экспериментальных точек на узком интервале, а также зависит от природы и свойств функций, образующих линейное сочетание. Результат вследствие этого получается с большой ошибкой и коэффициенты  $C_i$  могут быть отрицательными.

Анализ вклада составляющих по (2) показал, что при малых  $F$  сильнее влияет составляющая с третьей степенью, затем со второй, а нулевая вносит существенный вклад только при больших отстройках выше нескольких мегагерц и значение коэффициента  $k_0$  в общей формуле можно определить из экспериментальных характеристик при  $F > 10$  МГц. Составляющая же с первой степенью существенного влияния на результат не оказывает (ее вклад более чем на 15 дБ меньше всех остальных). Поэтому с погрешностью менее 3% ею можно пренебречь. Таким образом, можно определить два коэффициента регрессионной модели из  $g(F) = \sum_{i=2}^3 C_i F^{-i}$ , а коэффициент  $C_0 = 10^{k_0}$  определить непосредственно из экспериментальных шумовых характеристик.

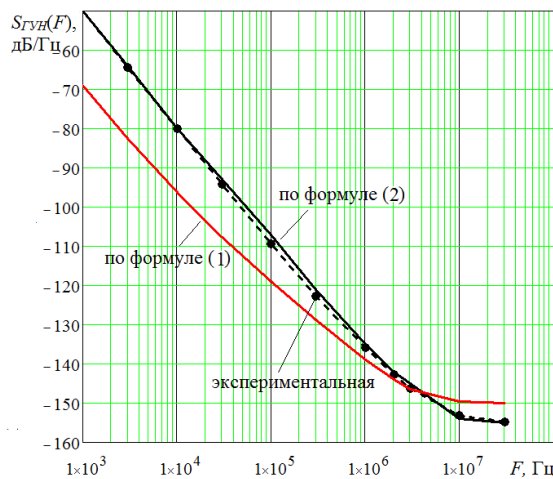


Рис. 1. Теоретические и экспериментальная шумовые характеристики ГУН

На рисунке 1 приведены рассчитанные по (2) теоретические шумовые характеристики ГУН и сравнение их с экспериментальными. Для сравнения приведены шумовые характеристики этого же генератора, полученные по формуле (1).

Как видно, обобщенная формула модели (1) требует для конкретного случая подбора коэффициентов с точным знанием добротности используемой контурной системы, а предлагаемая методика позволяет быстро получить математическую модель шумовых характеристик для конкретного генератора на основе его экспериментальных характеристик с погрешностью в единицы дБ.

Таким образом, предлагаемый подход определения коэффициентов математической

модели спектральной плотности мощности фазовых шумов генераторов сигналов на основе экспериментальных шумовых характеристик позволяет существенно повысить (на 3-10 дБ/Гц) точность модели для используемых генераторов, что позволяет применять такие модели для теоретической оценки шумовых свойств вариантов построения устройств формирования сигналов в целом с высокой достоверностью.

### Литература

1. Leeson D.B. A simple model of feedback oscillator noise spectrum. – IEEE Proc. Letters, February 1966, v.54, p.329–330.
2. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
3. Kroupa V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis. 2003, John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-470-84866-9. – 320 с.
4. Drucker, Erik. Model PLL Dynamics and Phase-Noise Performance. Microwaves & RF, 2000. № 2. pp. 73–117