

УДК 621.396

**Моделирование шумовых характеристик генераторов сигналов радиолокационных систем**

Ромашов В.В., Грошков И.Д.

Проведен расчет коэффициентов аппроксимации спектральной плотности мощности фазовых шумов в одной боковой полосе на основе экспериментальных шумовых характеристик генераторов. Получена математическая модель спектральной плотности мощности фазовых шумов конкретных типов генераторов, применяемых в устройствах формирователей сигналов радиолокационных систем. Погрешность полученных математических моделей в сравнении с экспериментальными шумовыми характеристиками составляет менее 3 дБн.

*Ключевые слова:* спектральная плотности мощности фазовых шумов, шумовые характеристики, генераторы сигналов, формирователи радиолокационных сигналов.

**Введение**

При проектировании радиолокационных систем одной из ключевых технических задач является анализ фазовой и частотной нестабильности синтезаторов частот. Для оценки фазовой и частотные нестабильности устройств синтезирования и формирования сигналов, используется спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов  $S(F)$ . СПМ фазовых флуктуаций характеризуется как средний квадрат отклонения фазы сигнала от ее номинального значения под действием шумов на заданной частоте в полосе 1 Гц.

При моделировании основных функциональных звеньев высокочастотного тракта радиолокационной системы могут быть использованы модели СПМ фазовых шумов, приведённые в [1-5]. Их применение существенно упрощает анализ и проектирование устройств синтеза частот, формирователей сигналов и других устройств, позволяя обойтись без сложных экспериментальных исследований.

Суммарный уровень фазовых шумов устройств синтеза сигналов в значительной степени будет определяться характеристиками опорного генератора. Однако известные математические модели СПМ фазовых шумов генераторов являются усредненными, вследствие чего могут существенно отличаться от шумовых характеристик реальных устройств.

В связи с этим актуальной задачей становится разработка точных математических

моделей шумовых характеристик для конкретных типов генераторов сигналов на основе экспериментальных зависимостей.

Целью работы является разработка математических моделей СПМ фазовых шумов конкретных типов генераторов сигналов применяемых в радиолокационных системах на основе их экспериментальных шумовых характеристик.

**Моделирование СПМ фазовых шумов генераторов сигналов, применяемых в радиолокационных системах**

Для достижения низкого уровня фазовых шумов синтезаторов частот могут использоваться генераторы на основе ферромагнитного резонанса в железо-иттриевом гранате (ЖИГ). Однако применение ЖИГ генераторов в составе формирователей радиолокационных сигналов имеет ряд ограничений, самое серьёзное из которых – низкая скорость перестройки [6].

В синтезаторах с фазовой подстройки частоты (ФАПЧ) всё чаще используются генераторы, управляемые напряжением (ГУН). По сравнению с ЖИГ скорость перестройки частоты, энергопотребление и габариты ГУН значительно меньше, однако их шумовые характеристики гораздо хуже [6].

Основополагающее соотношение для построения модели СПМ фазовых шумов генераторов приведена в [7] и имеет вид:

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

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  $f_0$ .

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

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

Для конкретных типов генераторов математические модели будут иметь существенные различия в коэффициентах  $k_i$ . В [8] приводится методика для определения коэффициентов модели для конкретного типа генератора по имеющимся экспериментальным характеристикам СПМ фазовых шумов на основе регрессии выборки данных линейной комбинацией функций вида:

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

Значения  $10^{k_i}$  могут быть получены при использовании интегрированной в среду Mathcad функции  $\text{linfit}(F, S, g)$  – определяющей вектор параметров линейной комбинации функций пользователя. Здесь  $F$  – это вектор действительных данных аргумента (частоты отстройки), элементы которого расположены в порядке возрастания;  $S$  – вектор действительных значений СПМ фазовых шумов того же размера;  $g(F)$  – пользовательская векторная функция скалярного аргумента.

Коэффициенты  $k_i$  могут быть определены по формуле:

$$k_i = \lg(C_i), \quad (5)$$

где  $C_i = \text{linfit}(F, S, g(F))$ .

Ввиду большого количества линейного сочетания функций получаемая матрица коэффициентов является плохо обусловленной, в следствии чего коэффициенты  $C_i$  могут быть отрицательными [8].

В связи с этим необходимо исследовать возможность использования описанной методики для моделирования СПМ фазовых шумов конкретных типов генераторов, используемых для построения устройств формирования радиолокационных сигналов.

Моделирование проводилось для кварцевого генератора ГК219-ТС производства АО «Морион» [9] и ГУН из состава синтезатора частоты 1508МТ015 производства АО «ПКК Миландр» [10].

Для кварцевого генератора опорной частоты (ГОЧ) ГК219-ТС помощью функции  $\text{linfit}(F, S, g)$  положительные коэффициенты  $C_i$  были получены для матрицы вида:

$$g(F) = \left( \frac{1}{F^3}, \frac{1}{F^2}, \frac{1}{F^1} \right). \quad (6)$$

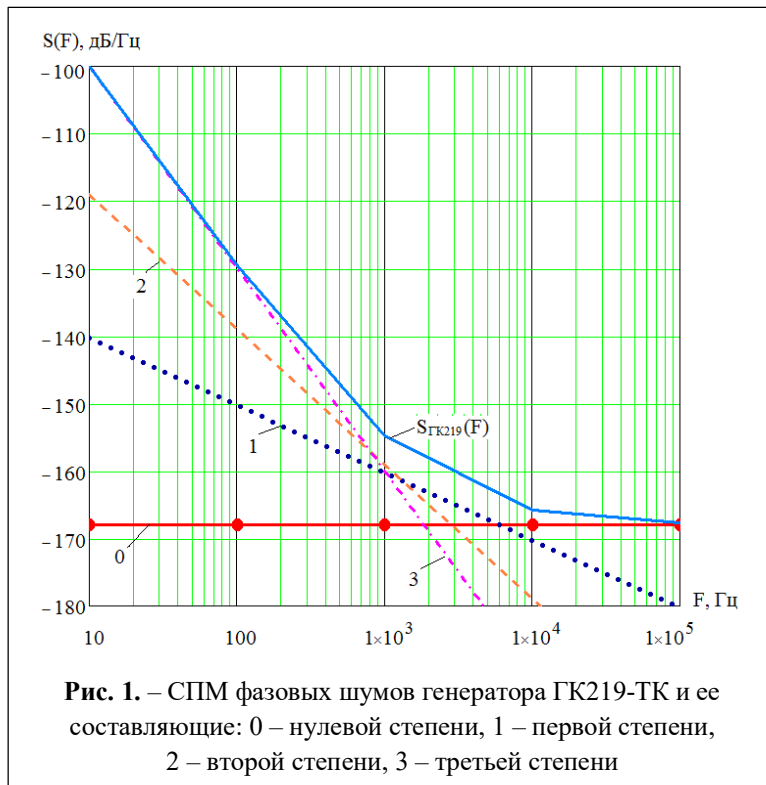
Используя экспериментальные значения матрицы  $S(F)$  для частот отстройки  $F$  от 10 Гц до 100 кГц на частоте генератора 96 МГц, были получены значения коэффициентов  $k_3 = -7,0$ ,  $k_2 = -9,9$ ,  $k_1 = -13,02$ . Коэффициент  $k_0 = -16,8$  взят из экспериментальной характеристики при  $F = 100$  кГц.

Полученная математическая модели СПМ фазовых шумов кварцевого генератора ГК219-ТС будет иметь вид:

$$S_{\text{ГК219}}(F) = \frac{10^{-7}}{F^3} + \frac{10^{-9,9}}{F^2} + \frac{10^{-13,02}}{F^1} + 10^{-16,8}. \quad (7)$$

На рис. 1 приведена графическая зависимость результирующей шумовой характеристики  $S_{\text{ГК219}}(F)$  и ее составляющих соответствующих степеней.

Из рис. 1 видно, что на различных частотах отстройки преобладает вклад составляющих различных степеней. Влияние составляющей 4-ой степени частоты отстройки  $F$  проявляется только при очень малых расстройках и, следовательно, ей можно пренебречь.



Для ГУН из состава синтезатора частоты 1508МТ015 коэффициенты  $C_i$  были рассчитаны для матрицы вида:

$$g(F) = \left( \frac{1}{F^4}, \frac{1}{F^3}, \frac{1}{F^2}, \frac{1}{F^1} \right). \quad (8)$$

Для получения значения коэффициентов использовались экспериментальные значения матрицы  $S(F)$  с частотами отстройки  $F$  от 1 кГц до 100 МГц для частоты генератора 3000 МГц.

Вычисленные значения коэффициентов  $k_4=1,35$ ,  $k_3=4,3$ ,  $k_2=-1,51$ ,  $k_1=-7,71$  и значение коэффициента  $k_0$ , полученное из экспериментальной характеристики при  $F=100$  МГц, были подставлены (3). В результате была получена математическая модели СПМ фазовых шумов ГУН:

$$S_{1508MT015}(F) = \frac{10^{1,35}}{F^4} + \frac{10^{4,3}}{F^3} + \frac{10^{-1,51}}{F^2} + \frac{10^{-7,71}}{F^1} + 10^{-15,7}. \quad (9)$$

Графическая зависимость результирующей шумовой характеристики  $S_{1508MT015}(F)$  и ее составляющих соответствующих степеней приведена на рис. 2.

Как видно из рис. 2 видно, вклад в результирующий уровень СПМ фазовых шумов вносят составляющие всех степеней. Можно отметить, что также как и для ГОЧ влияние составляющей с четвертой степенью проявляется только при малых отстройках.

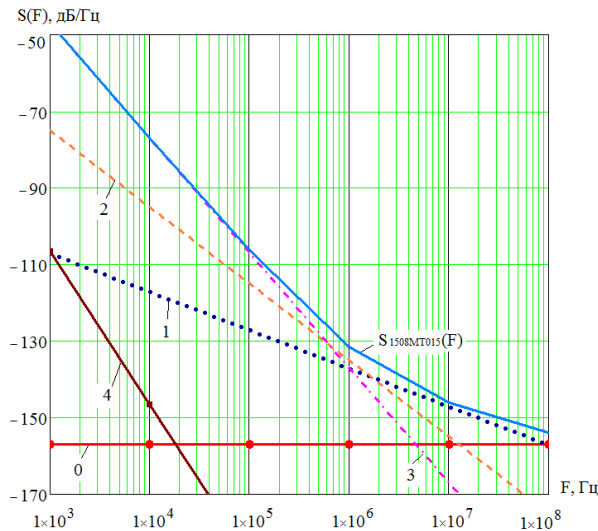
На рис. 3 и 4 приведены рассчитанные по (7) и (9) теоретические шумовые характеристики ГОЧ и ГУН и сравнение их с экспериментальными.

Из рис. 3 и 4 видно, что погрешность предложенной модели СПМ фазовых шумов ГОЧ не превышает одного децибела, а для ГУН предложенная модель СПМ фазовых шумов имеет погрешность порядка 3-х децибел на отстройке 10 МГц.

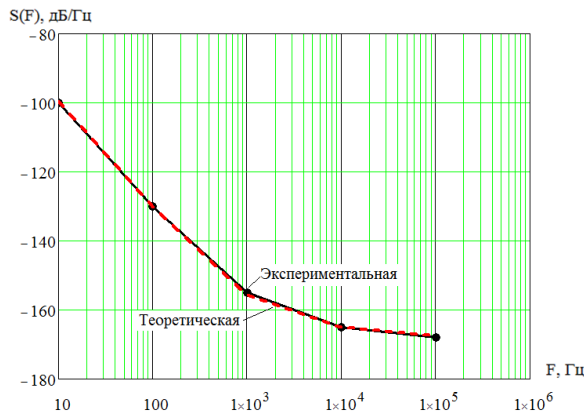
### Заключение

Полученные математические модели СПМ фазовых шумов генераторов сигналов, применяемых в радиолокационных системах, имеют погрешностью менее 3 дБ/Гц. Предложенные модели могут быть использованы для теоретической оценки шумовых характеристик устройств формирования радиолокационных сигналов.

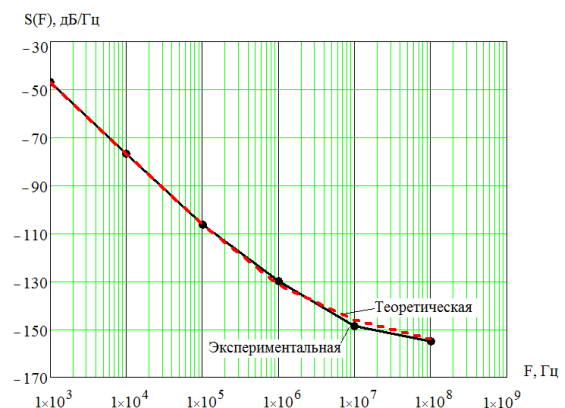
Использование метода регрессионного моделирования позволило на основе экспериментальных характеристик генератора минимизировать время, затраченное на подбор коэффициентов, и быстро получить точную математическую модель СПМ фазовых шумов без использования значения добротности контурной системы генератора.



**Рис. 2.** – СПМ фазовых шумов ГУН из состава синтезатора частоты 1508MT015 и ее составляющие: 0 – нулевой степени, 2 – второй степени, 3 – третьей степени, 4 – четвертой степени



**Рис. 3.** – Теоретические и экспериментальная шумовые характеристики ГОЧ



**Рис. 3.** – Теоретические и экспериментальная шумовые характеристики ГУН

### Литература

1. Siddiq K., Hobden M.K., Pennock S.R., Watson R.J. Phase Noise in FMCW Radar Systems // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019 vol. 55, no. 1, pp. 70-81.
2. Kroupa V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis. 2003, John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-470-84866-9. – 320 с.
3. Drucker, Erik. Model PLL Dynamics and Phase-Noise Performance. *Microwaves & RF*, 2000. № 2. pp. 73–117
4. 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.
5. Качармина Е.Г., Толкачев П.А., Шахтарин Б.И. Полиномиальная модель расчета уровня шумов в синтезаторах частот // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 2.

С. 41 - 47.

6. Ченакин А. ГУН или ЖИГ? Проблема выбора при проектировании высококачественного синтезатора с ФАПЧ // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2012, № 6. С. 118 – 122.
7. Leeson D.B. A simple model of feedback oscillator noise spectrum. – IEEE Proc. Letters, February 1966, v.54, p.329–330.
8. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K. The regression model of power spectral density of phase noise of direct digital synthesizers // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016; National Research University "Higher School of Economics" Moscow; Russian Federation; 12 May 2016 through 14 May 2016; Category number CFP16794-CDR; Code 122173.
9. Генераторы пьезоэлектрические термостатированные ГКС219-ТС. Технические условия ГЖКД 433535.444 ТУ.

---

10. Микросхема синтезатора частот с дробным коэффициентом деления и встроенным генератором, управляемым напряжением 1508MT015.

<https://ic.milandr.ru/upload/iblock/104/1508%D0%9C%D0%A2015.pdf>.

**Поступила 15 сентября 2020 г.**

---

The coefficients of approximation of the spectral power density of phase noise in one sideband are calculated based on the experimental noise characteristics of the generators. A mathematical model of the power spectral density of phase noise of specific types of generators used in devices of signal generators of radar systems is obtained. The error of the obtained mathematical models in comparison with the experimental noise characteristics is less than 3 dBn.

*Key words:* spectral power density of phase noise, noise characteristics, signal generators, radar signal generators.

---

*Ромашов Владимир Викторович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* romashovmurom@mail.ru.

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

*Грошков Игорь Дмитриевич* – инженер-конструктор 1 категории АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов».

*Адрес:* 602267, Муром, ул. Карачаровское шоссе, д. 2.