

## Разработка математических моделей шумовых характеристик современных интегральных микросхем ФАПЧ

К.А. Якименко, Л.В. Ромашова

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», 602264, г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская д.23. E-mail: [yakimenko.kirill@yandex.ru](mailto:yakimenko.kirill@yandex.ru).

Разработаны математические модели спектральной плотности мощности фазовых шумов интегральных синтезаторов на основе систем фазовой автоподстройки частоты фирмы Analog Devices.

Синтезаторы частот широко применяются в качестве формирователей сигналов в современных радиосистемах [1, 2]. Для теоретического анализа шумовых характеристик синтезаторов частот используются математические модели спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов в зависимости от частоты отстройки от несущей  $F$ , представленные в виде степенных полиномов [3, 4]. Целью данной работы является разработка математических моделей СПМ фазовых шумов интегральных синтезаторов на основе систем фазовой автоподстройки частоты, производимых фирмой Analog Devices [5], с целью их дальнейшего использования при разработке специализированного программного обеспечения для анализа шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза.

Интегральные синтезаторы ФАПЧ (без встроенного генератора, управляемого напряжением – ГУН) содержат импульсный частотно-фазовый детектор (ИЧФД) и два делителя частот (ДЧ): делитель опорной частоты с коэффициентом деления  $R$  и делитель выходной частоты с коэффициентом деления  $N$ .

Математическая модель СПМ фазовых шумов ИЧФД имеет вид [6]:

$$S_{\text{ИЧФД}}(F) = \frac{4\pi^2}{f_{\text{CP}}^2} K_{\text{ИЧФД}}^2 \left( \frac{8kT}{3S_{\text{тр}}} \left( \frac{f_a}{F} + 1 \right) \right) + \frac{4 \left( 4kTs_{\text{тр}} \left( \frac{f_a}{F} + 1 \right) \right)}{S_{\text{ИЧФД}}} \left( \frac{t_{\text{сбр}}}{f_{\text{CP}}} \right)^2, \quad (1)$$

где  $f_{\text{CP}}$  – частота сравнения;  $K_{\text{ИЧФД}}$  – усредненный коэффициент чувствительности для логической схемы ИЧФД;  $S_{\text{тр}}$  – крутизна проходной характеристики транзистора при максимальном токе в области переключения;  $S_{\text{ИЧФД}}$  – крутизна дискриминационной характеристики ИЧФД;  $f_a$  – частота перехода от области преобладания шума типа  $1/F$  к области тепловых шумов;  $t_{\text{сбр}}$  – длительность импульсов сброса триггеров.

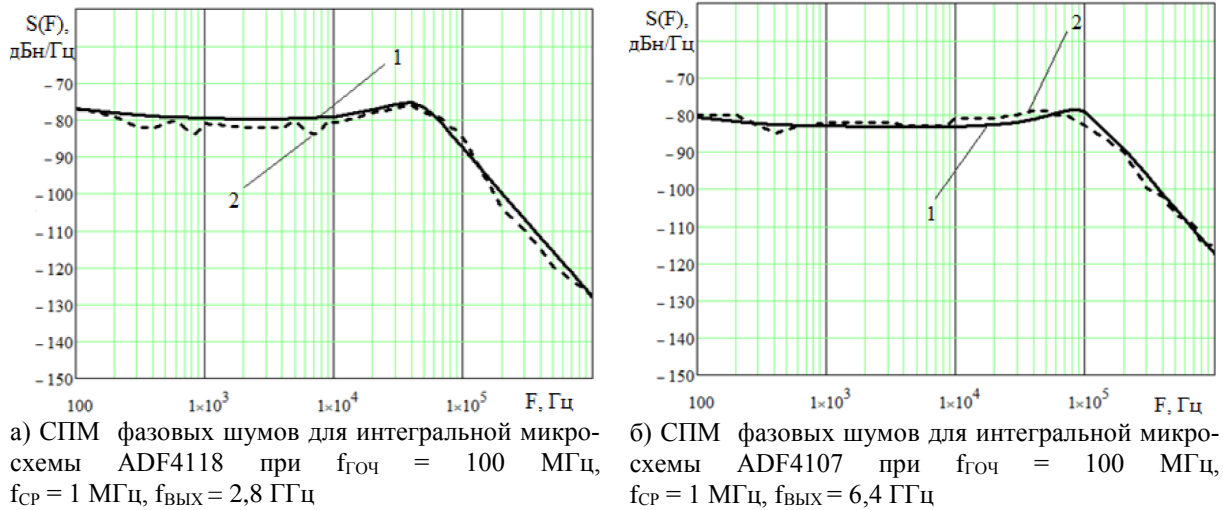
Обобщенная математическая модель СПМ фазовых шумов синтезаторов частот, реализованных на интегральных микросхемах ФАПЧ, будет иметь вид:

$$S_{\text{СЧ}}(F) = S_{\text{ФАПЧ}}(F) \cdot |H_{31}(j2\pi F)|^2 + \left[ \frac{S_{\text{ГОЧ}}(F)}{R^2} + S_{\text{ФНЧ}}(F) \right] \cdot |H_{31}(j2\pi F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) \cdot |H_{32}(j2\pi F)|^2, \quad (2)$$

где  $S_{\text{ФАПЧ}}(F) = S_{\text{ИЧФД}}(F) + 2S_{\text{ДЧ}}(F)$  – СПМ фазовых шумов микросхемы ФАПЧ с уче-

том шумов ИЧФД и делителей частот;  $H_{31}(j2\pi F)$  – передаточная функция кольца ФАПЧ по внешним шумам;  $H_{32}(j2\pi F)$  – передаточная функция кольца ФАПЧ по внутренним шумам;  $S_{ГОЧ}(F)$ ,  $S_{ФНЧ}(F)$ ,  $S_{ГУН}(F)$  – СПМ фазовых шумов генератора опорной частоты, петлевого ФНЧ и генератора, управляемого напряжением соответственно [1].

По (2) было проведено моделирование СПМ фазовых шумов серии интегральных микросхем ФАПЧ фирмы Analog Devices. Примеры сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными для микросхем ADF4118 и ADF4107 представлены на рис. 1.



а) СПМ фазовых шумов для интегральной микросхемы ADF4118 при  $f_{ГОЧ} = 100$  МГц,  $f_{СР} = 1$  МГц,  $f_{ВЫХ} = 2,8$  ГГц

б) СПМ фазовых шумов для интегральной микросхемы ADF4107 при  $f_{ГОЧ} = 100$  МГц,  $f_{СР} = 1$  МГц,  $f_{ВЫХ} = 6,4$  ГГц

**Рис. 1. Сравнение результатов моделирования шумовых характеристик (кривая 1) с экспериментальными данными (кривая 2)**

По рис. 1 можно сделать вывод, что экспериментальные кривые практически совпадают с результатами моделирования. Таким образом, разработанные математические модели позволяют проводить моделирование СПМ фазовых шумов интегральных микросхем для любого значения опорной и выходной частот.

Разработанные математические модели будут использованы для пополнения базы данных специализированного программного средства для структурного проектирования и анализа шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза [7].

## Литература

1. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.
2. 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. 2014. Pp. 294–295.
3. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Якименко К.А. Исследование шумовых характеристик гибридного синтезатора частот на основе цифрового вычислительного синтезатора и двухкольцевой ИФАПЧ // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2014. № 16. С. 18–24.
4. Romashov V.V., Yakimenko K.A. Modelling and comparing of phase noise curves of hybrid synthesizers // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings 2015.
5. Сайт фирмы Analog Devices, Inc. - 2019. [Электронный ресурс] – Режим доступа:

<https://www.analog.com/ru/index.html> (дата обращения 19.05.2019).

6. Жабин, А.С., Кулешов В.Н., Голубков А.В. Собственные шумы ИЧФД и их влияние на работу синтезатора частот // Вестник МЭИ. №1. 2011. С. 60–68.

7. Ромашов В.В., Якименко К.А. Программный комплекс для проектирования гибридных синтезаторов частот и моделирования их шумовых характеристик // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2018. №1. С. 36–44.