

## ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА УРОВНЯ ШУМОВ В СИНТЕЗАТОРАХ ЧАСТОТ

Е.Г. Качармина<sup>1</sup>  
П.А. Толкачев<sup>2</sup>  
Б.И. Шахтарин<sup>1</sup>

kacharmina.elena@gmail.com  
tolkachevpa@mail.ru

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> В/ч 33965

---

### Аннотация

Описаны принципы функционирования синтезаторов частот с делителем с дробно-переменным коэффициентом деления. Проведен анализ шумовых характеристик всех элементов, входящих в состав синтезаторов. Разработана полиномиальная модель расчета уровня шумов в синтезаторах частот. Приведены результаты моделирования фазовых шумов полиномиальным методом для всех компонентов схемы. Выполнено сравнение полученных результатов с результатами моделирования в пакете ADIsimPLL

### Ключевые слова

*Синтезатор частот, фазовый шум, фазовая автоподстройка частоты, полиномиальная модель*

Поступила в редакцию 07.07.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

---

В настоящее время основным принципом расчета шумов синтезаторов частот (СЧ) является принцип аддитивности, при котором считается, что все шумы, генерируемые или добавляемые каждым структурным компонентом схемы, очень малы по сравнению с мощностью полезного сигнала, и в соответствии с правилом наложения их можно добавлять к соответствующим входным или выходным воздействиям. Однако, когда система имеет достаточно сложную структуру или много нелинейных элементов, применение данного метода затруднительно. В подобных ситуациях на первую позицию выходит узкоспециализированное ПО, которое помогает инженеру в расчете конечного результата. Рассчитать шумы СЧ, построенных на элементной базе, не входящей в САПР, но имеющих необходимые технические характеристики, достаточно сложно. Поэтому задача определения уровня помех сложных систем является весьма актуальной.

Работе такого сложного устройства, как СЧ смешанного синтеза (с системой импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАПЧ)) с цифровым делителем с дробно-переменным коэффициентом деления (ДДПКД), посвящено большое число работ и публикаций, описывающих принципы работы самого устройства, его отдельных узлов и их шумовых характеристик. В результате исследований шумовых характеристик был сделан вывод, что наиболее сложной для расчета является помеха, вносимая работой ДДПКД [1]. В целях борьбы с возникающими в результате работы данного блока шумами можно применять различные способы, наиболее новым и перспективным из которых является использование

в качестве устройства компенсации помехи сигма-дельта модулятора (СДМ) [1, 2]. Поэтому представляется интересным получить модель СЧ с ДДПКД и СДМ, позволяющую рассчитать фазовые шумы в работе устройства, имея лишь технические характеристики элементной базы.

Для оценки спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых флуктуаций сигнала необходимо определить шумовые характеристики всех элементов, входящих в состав колец ИФАПЧ.

В электронных компонентах всегда имеются источники электрических шумов, генерирующие белый и фликкер-шум [3]. В зависимости от положения генератора имеет место либо фазовая модуляция исходными шумовыми процессами (при внешних источниках шума), либо частотная (при внутренних источниках). Установлено [4], что СПМ фазовых флуктуаций сигнала генераторов целесообразно представлять в виде модели, известной как модель генератора Лисона:

$$S_{\varphi} = h_{\alpha} \omega^{-\alpha}.$$

В типичном случае показатель степени  $\alpha$  принимает целочисленные значения 0, 1, 2, 3, 4 и характеризует виды шума:  $h_0$  — белый фазовый шум;  $h_1 \omega^{-1}$  — фазовый фликкер-шум;  $h_2 \omega^{-2}$  — белый частотный шум;  $h_3 \omega^{-3}$  — частотный фликкер-шум;  $h_4 \omega^{-4}$  — частотный шум случайных блужданий. Постоянная  $h_{\alpha}$  служит мерой уровня шума.

Схемотехника современных СЧ подразумевает изготовление нескольких блоков в виде отдельного цифрового модуля (ЦМ). Современная элементная база позволяет изготавливать такие блоки, как импульсный частотно-фазовый детектор (ИЧФД), блок токовой подкачки (ТП), делитель с переменным коэффициентом деления (ДПКД), ДДПКД, СДМ в едином ЦМ.

Сведения производителей интегральных микросхем синтезаторов частот указывают, что эквивалентная СПМ фазового шума ЦМ, состоящего из делителя с фиксированным коэффициентом деления (ДФКД), ДПКД/ДДПКД и ИЧФД, может быть представлена следующим образом:

$$S_{\varphi}^{\text{ЦМ}}(\omega) = \frac{P_1 \omega_{\text{д}}^2}{\omega} + P_0 \omega_{\text{д}},$$

где  $\omega_{\text{д}}$  — частота дискретизации в кольце ИФАПЧ;  $\omega$  — отстройка по частоте от частоты несущего колебания;  $P_1, P_0$  — константы, определяемые выбранной микросхемой.

Следует пояснить данное утверждение. Как известно, производители ЦМ в техническом описании на свое изделие указывают численное значение следующих величин: Normalized Phase Noise Floor и Normalized 1/f Noise, что является ничем иным, как усредненным значением белого фазового шума и фазового фликкер-шума. Исходя из этого, можно представить шумовые характеристики ЦМ в виде полинома, описанного ранее. Более подробно подобное действие разъяснено в работах [5].

Таким образом, СПМ внешних и внутренних воздействий в СЧ с ИФАПЧ можно представить в виде полиномов степенных функций:

$$S_{\phi}^{\text{ОГ}}(\omega) = \sum_{i=0}^4 h_i^{\text{ОГ}} \omega^{-i}; \quad S_{\phi}^{\text{УГ}}(\omega) = \sum_{i=0}^4 h_i^{\text{УГ}} \omega^{-i};$$

$$S_{\phi}^{\text{ЦМ}}(\omega) = \sum_{i=0}^1 h_i^{\text{ЦМ}} \omega^{-i}; \quad S_{\phi}^{\text{ФНЧ}}(\omega) = \sum_{i=0}^4 h_i^{\text{ФНЧ}} \omega^{-i},$$

где  $S_{\phi}^{\text{ОГ}}(\omega)$ ,  $S_{\phi}^{\text{УГ}}(\omega)$  — СПМ фазовых флуктуаций сигналов опорного генератора (ОГ) и управляемого генератора (УГ);  $h_i$  — коэффициенты аппроксимации СПМ воздействий, определяемые теоретически или экспериментально;  $S_{\phi}^{\text{ЦМ}}(\omega)$  — пересчитанный на вход кольца эквивалентный фазовый шум ЦМ, состоящего из ДФКД, ДПКД/ДДПКД и ИЧФД;  $S_{\phi}^{\text{ФНЧ}}(\omega)$  — шум ФНЧ.

Запишем уравнение для определения фазовых шумов на выходе схемы, приведенной на рис. 1 [6], выражая комплексные коэффициенты фазового шума через передаточные функции линеаризованных блоков и передаточную функцию всей системы:

$$S_{\phi}(\omega) = (S_{\phi}^{\text{ОГ}}(\omega) + S_{\phi}^{\text{ЦМ}}(\omega)) |K_1(j\omega)|^2 + S_{\phi}^{\text{УГ}}(\omega) |K_2(j\omega)|^2 + S_{\phi}^{\text{ФНЧ}}(\omega) |K_3(j\omega)|^2, \quad (1)$$

$$K_1(j\omega) = \frac{G(j\omega)N}{1+G(j\omega)}; \quad K_2(j\omega) = \frac{1}{1+G(j\omega)};$$

$$K_3(j\omega) = \frac{K_{\text{УГ}}}{j\omega(1+G(j\omega))}; \quad G(j\omega) = \frac{K_{\text{ЧФД}}K_{\text{УГ}}K_{\phi}}{N+j\omega},$$

где  $K_1(j\omega)$ ,  $K_2(j\omega)$ ,  $K_3(j\omega)$  — комплексные коэффициенты передачи фазовых шумов сигналов ОГ и УГ и шума фильтра нижних частот (ФНЧ) соответственно;  $G(j\omega)$  — коэффициент передачи кольца ИФАПЧ;  $K_{\text{УГ}}$  — крутизна регуляторной характеристики УГ;  $K_{\text{ЧФД}}$  — крутизна дискриминационной характеристики фазового детектора;  $K_{\phi}$  — коэффициент передачи петлевого фильтра (ФНЧ);  $N$  — значение коэффициента деления ДПКД.

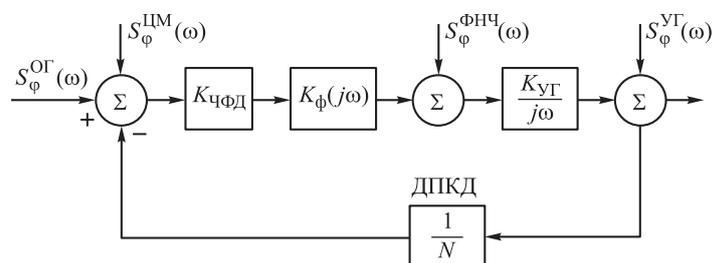


Рис. 1. Структурная схема однокольцевого СЧ с ИФАПЧ и источниками шума

Передаточная функция ФНЧ зависит от выбора типа петлевого фильтра. В случае выбора петлевого фильтра, состоящего из пассивных элементов, основной вклад в шумовую составляющую системы будет вносить сопротивление [4].

Как правило, любое устройство сопровождается справочными данными, в которых указываются его параметры и технические характеристики. Для генераторов одним из таких параметров являются шумы при отстройке от номинальной частоты генератора на заданную величину. С помощью этих данных можно восстановить частотную характеристику распределения СПМ фазовых шумов [7], тем самым подобрав коэффициенты полиномиального выражения. Для расчета нашей модели воспользуемся коэффициентами, приведенными в табл. 1 [8].

Таблица 1

Значения коэффициентов полиномиального выражения

Компонент	Коэффициент	Значение
Опорный генератор	$h_0^{OG}$	$10^{-15,8}$
	$h_1^{OG}$	$10^{-12,7}$
	$h_2^{OG}$	$10^{-9,86}$
	$h_3^{OG}$	$10^{-7,82}$
Цифровой модуль	$h_0^{CM}$	$10^{-15,5}$
	$h_1^{CM}$	$10^{-12,5}$
ФНЧ	$h_r$	$10^{-12,64}$
Управляемый генератор	$h_0^{YU}$	$10^{-15,8}$
	$h_1^{YU}$	$10^{-12,7}$
	$h_2^{YU}$	$10^{-9,86}$
	$h_3^{YU}$	$10^{-7,82}$

На рис. 2 показан результат моделирования фазовых шумов выходного сигнала, при этом итоговый уровень шумов является суммой шумов отдельных компонентов. Как следует из рис. 2, шумы от работы цифрового модуля вносят наибольший вклад в итоговый уровень фазовых шумов СЧ.

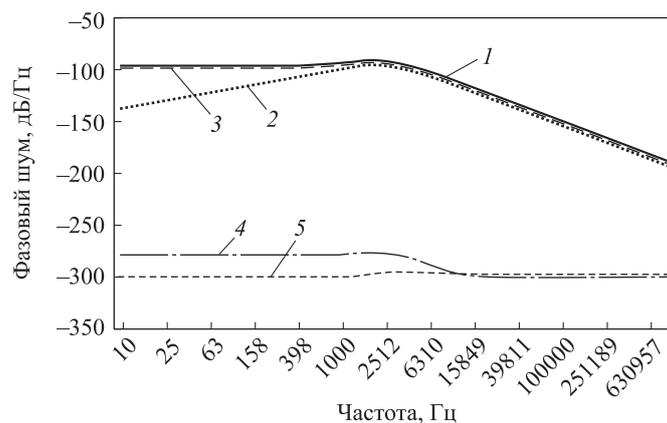


Рис. 2. Результат моделирования фазовых шумов СЧ полиномиальным методом:

1 — итоговый шум; 2 — ФНЧ; 3 — ЦМ; 4 — ОГ; 5 — УГ

Сравним результаты моделирования СЧ полиномиальным методом с моделированием СЧ на микросхеме ADF4110 в пакете имитационного моделирования ADIsimPLL (рис. 3).

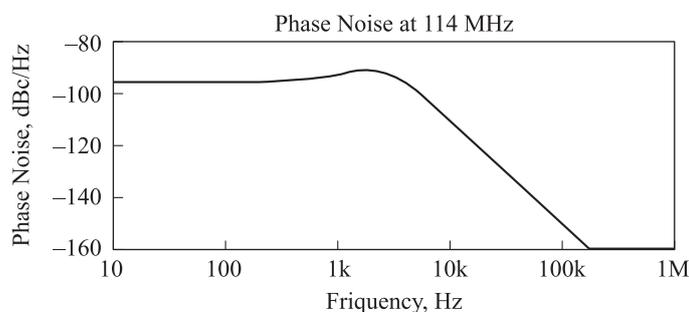


Рис. 3. Моделирование СЧ на микросхеме ADF4110 в пакете имитационного моделирования ADIsimPLL

Для наглядного сравнения результатов, полученных с помощью полиномиальной модели и моделирования в пакете ADIsimPLL, приведем значения СПМ фазовых шумов в табл. 2.

Таблица 2

**Значения СПМ фазовых шумов**

Частота, Гц	СПМ полиномиальной модели, дБ/Гц	СПМ моделирования, дБ/Гц
10	-95,8388	-95,9
100	-95,7780	-95,8
1000	-92,4686	-92,5
10000	-110,216	-110,2
100000	-149,965	-150

Исходя из идентичности результатов, приведенных в табл. 2, полученных с помощью полиномиальной модели и моделирования в программной среде ADIsimPLL, можно сделать вывод о том, что можно использовать полученную полиномиальную модель в расчете паразитных флуктуаций фазы для микросхем любых производителей без использования узкоспециализированного ПО.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Rhee W., Xu N., Zhou B., Wang Zh. Fractional-N frequency synthesis: overview and practical aspects with FIR-embedded design // JSTS. 2013. Vol. 13. No. 2. P. 170–183. DOI: 10.5573/JSTS.2013.13.2.170 URL: [http://koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=E1STAN\\_2013\\_v13n2\\_170](http://koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=E1STAN_2013_v13n2_170)
2. Norsworthy S.R., Schreier R., Temes G.C., ed. Delta-sigma data converters. Theory, design, and simulation. Wiley-IEEE, 1996. P. 165–192.

3. Вишняков Д.Ю. Структурно-параметрический синтез широкополосных СВЧ-синтезаторов частот с ИФАПЧ. Дисс. ... канд. техн. наук. Ярославль: Гос. университет, 2014. 148 с.
4. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991. С. 9–13.
5. Drucker E. Model PLL dynamics and phase-noise performance. P. 1 // *Microwaves & RF*. 1999. No. 4. P. 69–84.
6. Манасевич В. Синтезаторы частот. Теория и проектирование. М.: Связь, 1979. С. 112–180.
7. Шахтарин Б.И. Синтезаторы частот. М.: Горячая линия–Телеком, 2007. С. 20–23.
8. Drucker E. Model PLL dynamics and phase-noise performance. P. 2 // *Microwaves & RF*. 2000. No. 2. P. 88–96.

**Качармина Елена Геннадиевна** — аспирант кафедры «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Толкачев Павел Анатольевич** — инженер в/ч 33965.

**Шахтарин Борис Ильич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

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. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-2-41-47

## POLYNOMIAL MODEL FOR COMPUTING NOISE LEVELS IN FREQUENCY SYNTHESISERS

E.G. Kacharmina<sup>1</sup>

kacharmina.elena@gmail.com

P.A. Tolkachev<sup>2</sup>

tolkachevpa@mail.ru

B.I. Shakhtarin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Military Unit Number 33965

### Abstract

The article describes principles of operation behind frequency synthesisers with fractional-N dividers. We analysed noise characteristics of all the elements the synthesisers comprise. We developed a polynomial model for computing noise levels in frequency synthesisers. We present the results of simulating phase noises by the polynomial method for all circuit elements, as well as a comparison of these results to simulation performed in the ADIsimPLL software package

### Keywords

*Frequency synthesiser, phase noise, phase-locked loop, polynomial model*

Received 07.07.2017

© BMSTU, 2018

## REFERENCES

- [1] Rhee W., Xu N., Zhou B., Wang Zh. Fractional-N frequency synthesis: overview and practical aspects with FIR-embedded design. *JSTS*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 170–183.  
DOI: 10.5573/JSTS.2013.13.2.170  
Available at: [http://koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=E1STAN\\_2013\\_v13n2\\_170](http://koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=E1STAN_2013_v13n2_170)
- [2] Norsworthy S.R., Schreier R., Temes G.C., ed. Delta-sigma data converters. Theory, design, and simulation. Wiley-IEEE, 1996. Pp. 165–192.
- [3] Vishnyakov D.Yu. Strukturno-parametricheskii sintez shirokopolosnykh SVCh sintezatorov chastot s IFAPCh. Diss. kand. tekhn. nauk [Structural-parametric synthesis of wideband UHF frequency synthesiser with PLL. Kand. tech. sci. diss.]. Yaroslavl', Gosudarstvennyy Universitet Publ., 2014. 148 p. (in Russ.).
- [4] Ryzhkov A.V., Popov V.N. Sintezatory chastot v tekhnike radiosvyazi [Parametric synthesis in radio communication technique]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991. Pp. 9–13.
- [5] Drucker E. Model PLL dynamics and phase-noise performance. P. 1. *Microwaves & RF*, 1999, no. 4, pp. 69–84.
- [6] Manassevitch V. Frequency synthesizers: theory and design. Wiley, 1976. 524 p.
- [7] Shakhtarin B.I. Sintezatory chastot [Frequency synthesisers]. Moscow, Goryachaya liniya–Telekom Publ., 2007. Pp. 20–23 (in Russ.).
- [8] Drucker E. Model PLL dynamics and phase-noise performance. P. 2. *Microwaves & RF*, 2000, no. 2, pp. 88–96.

**Kacharina E.G.** — post-graduate student, Department of Autonomous Data Processing and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Tolkachev P.A.** — Engineer, Military Unit Number 33965.

**Shakhtarin B.I.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Autonomous Data Processing and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

### Please cite this article in English as:

Kacharina E.G., Tolkachev P.A., Shakhtarin B.I. Polynomial Model for Computing Noise Levels in Frequency Synthesisers. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 2, pp. 41–47 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2018-2-41-47