

**МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПАРАЗИТНЫХ ФАЗОВЫХ
ФЛУКТУАЦИЙ В ВЫХОДНОМ СИГНАЛЕ
СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ**

**П.А. Толкачев[@],
В.В. Сизых,
А.И. Стариковский**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: tolkachevpa@mail.ru

В работе рассматривается актуальная проблема расчета уровня паразитных флуктуаций фазы выходного сигнала синтезатора частот когерентного синтеза, построенного на основе фазовой автоподстройки частоты. За основу построения модели оценки уровня паразитных флуктуаций фазы берется модель распределения выходных шумов в виде степенной функции по принципу генератора Лисона. Описанные принципы работы синтезаторов частот с делителем с дробно-переменным коэффициентом деления, включенным в петлю обратной связи системы фазовой автоподстройки частоты, дают возможность понять природу появления так называемых дробовых шумов. Проведенный анализ характеристик всех элементов, входящих в состав синтезаторов частот, позволяет убедиться в возможности представления шумовых составляющих каждого отдельного блока в виде степенной функции с предварительно определенными коэффициентами. Разработанная модель спектральной плотности в виде степенной функции может быть предложена для оценочного расчета уровня шумов в синтезаторах частот на этапе выбора их структуры или оценочного расчета. В качестве подтверждения адекватности теоретических расчетов представлены результаты моделирования фазовых шумов предложенным алгоритмом для различных элементов схемы. Приведено сравнение полученных результатов с моделированием аналогичного синтезатора частот в пакете имитационного моделирования ADIsimPLL от компании Analog Devices. Подобное моделирование позволяет не только получить уровень побочных составляющих в спектре выходного сигнала в зависимости от выбранной структуры синтезатора частот, но и оценить степень влияния на него каждого конкретного элемента схемы.

Ключевые слова: синтезатор частот, фазовый шум, фазовая автоподстройка частоты, степенная функция, проектирование цифровых устройств.

MODEL OF EVALUATING THE LEVEL OF PARASITIC PHASE FLUCTUATIONS IN THE OUTPUT SIGNAL OF THE FREQUENCIES SYNTHESIZER

P.A. Tolkachev[@],
V.V. Sizykh,
A.I. Starikovskiy

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
[@]Corresponding author e-mail: tolkachevpa@mail.ru

The article describes the actual problem of calculating the level of parasitic fluctuations of the phase of the output signal of the frequency synthesizer of indirect synthesis based on phase-locked loop. The basis for constructing a polynomial model is the model of output noise distribution based on the Leeson generator principle. The described principles of operation of frequency synthesizers with a divider with a fractionally variable division factor allow us to understand the nature of the appearance of the so-called shot noise. The analysis of the characteristics of all the elements included in the frequency synthesizers makes it possible to ensure that the noise components of each individual unit can be represented as a polynomial. The possibility of using the developed polynomial model for estimating the noise level in frequency synthesizers at the stage of selecting the structure of the proposed implementation structure is proposed. As a demonstration of the adequacy of theoretical calculations, the results of phase noise simulation by the polynomial method for all circuit components are presented, as well as a comparison of the results obtained with the simulation of a similar frequency synthesizer in the «ADIsimPLL» simulation package from Analog Devices. Such a simulation allows not only to obtain the level of side components in the spectrum of the output signal, but also to estimate the degree of influence of each specific element of the circuit.

Keywords: frequency synthesizer, phase noise, phase-locked loop, polynomial model, digital device design.

Введение

На протяжении длительного времени основным инструментом оценки характеристик проектируемого инженером устройства являлось либо использование опыта разработки и знание характеристик однотипных технических средств, либо длительные и трудоемкие математические расчеты. В связи с изобретением и популяризацией ЭВМ трудоемкость математических расчетов существенно сократилась, и на первое место вышли программные средства оптимизации и системы автоматизированного проектирования – так называемые САПР или CAD (англ. *Computer-Aided Design*). Большинство крупных производителей электронной элементной базы, такие, как Analog Devices, Agilent Technologies и др., стали предлагать САПР собственного производства, ориентированные на использование при разработках продуктов, выпускаемых данным конкретным производителем, тем самым вынуждая потребителя пользоваться только собственной продукцией. Подобное явление не только ограничивает потенциальный выбор возможной элементной базы, но также резко снижает спрос на универсальные САПР,

включающие в себя широкий набор элементной базы различных производителей, вследствие дороговизны их приобретения и поддержки.

Отсюда очевидно, что разработка простых алгоритмов определения базовых характеристик на основе данных, которые производитель указывает в спецификации к своей продукции, является весьма актуальной проблемой. В настоящей статье в качестве такой базовой характеристики рассмотрен уровень паразитных девиаций фазы выходного сигнала синтезатора частот (СЧ). Сегодня базовым способом оценки паразитных девиаций фазы выходного сигнала СЧ считается способ «аддитивности», согласно которому все шумы, создаваемые или добавляемые структурными элементами схемы, достаточно малы в сравнении с уровнем оцениваемого сигнала, и в соответствии с правилом наложения разрешается складывать их с соответствующими входными или выходными воздействиями [1]. Тем не менее, когда система имеет достаточно сложную структуру или большое количество нелинейных элементов, использование подобного способа затруднительно. В таких случаях, чтобы оценить шумы СЧ, в основе которых элементная база, не использующаяся в САПР, большинство разработчиков будет вынуждено применять имеющееся бесплатное узкоспециализированное программное обеспечение. Наряду с этим придется модернизировать средства проектирования, что не всегда оправдано с точки зрения трудозатрат.

1. Разложение шумов для элементов системы в виде степенной функции

Синтезаторы частот с системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) находят самое обширное применение в радиоэлектронной аппаратуре. Они используются в качестве функциональных узлов в различных системах – от радиолокации и радионавигации до радиометрологии и прецизионных измерений. Поскольку СЧ в качестве функционального узла входят в обширный круг систем, при их конструировании неизбежно возникают задачи, связанные с оценкой получаемых параметров на самых ранних этапах проектирования. Касательно оценки шумовых характеристик большинство специалистов сходятся во мнении, что самое большое затруднение при оценке уровня помех вызывает помеха, производимая работой делителя с дробно-переменным коэффициентом деления (ДДПКД) [2]. В представленной статье предстоит найти модель СЧ с ДДПКД, позволяющую облегчить расчет фазовых шумов СЧ, имея в распоряжении лишь технические характеристики элементной базы.

Чтобы рассчитать спектральную плотность мощности (СПМ) фазовых флуктуаций выходного сигнала СЧ, необходимо задаться структурой проектируемого устройства и рассчитать шумовые характеристики всех элементов, входящих в состав СЧ (подобные коэффициенты указываются в спецификации на элементную базу). В любой используемой современными производителями элементной базе всегда присутствуют различные источники шумов, которые имеют электрическую природу. Подобные источники в большинстве своем генерируют белый и фликкер-шум [3]. При определенном расположении управляемого генератора в структурной схеме будет происходить или фазовая модуляция внешними источниками шума, или частотная – внутренними источниками. Показано [4], что СПМ паразитных девиаций фазы сигнала генераторов возможно отобразить в виде модели генератора Лисона:

$$S(f) = \gamma_{\alpha} f^{\alpha} \quad (1)$$

График функции представлен на рис. 1.

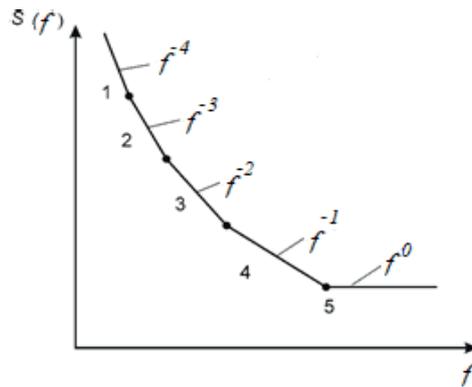


Рис. 1. Типичное распределение спектральной плотности мощности фазовых флуктуаций источников колебаний.

В наиболее распространенном виде показатель степени может принимать значения 0, 1, 2, 3, 4, что характеризует различную природу возникновения шумов (табл. 1) [5]. Постоянная γ_α – это мера уровня шума. Степенные функции служат общепризнанными моделями для описания спектральных плотностей шума, полученных на ограниченном частотном интервале преобразований Фурье.

Таблица 1. Представление шумов в зависимости от степени частотной компоненты

$S(f)$	Название
$\gamma_4 f^4$	Частотный шум случайных блужданий
$\gamma_3 f^3$	Частотный фликкер-шум
$\gamma_2 f^2$	Белый частотный шум
$\gamma_1 f^1$	Фазовый фликкер-шум
$\gamma_0 f^0$	Белый фазовый шум

Проектирование СЧ предполагает возможность производства различных структурных элементов схемы в виде обособленного цифрового модуля (ЦМ) [6]. Производство элементной базы позволяет изготавливать такие элементы схемы, как импульсный частотно-фазовый детектор (ИЧФД), токовая подкачка (ТП), ДПКД/ДДПКД в виде ЦМ.

Согласно заявленным производителями сведениям касательно интегральных микросхем СЧ, эквивалентная СПМ паразитных девиаций фазы ЦМ, состоящего из различных делителей и ИЧФД, представима в следующем виде:

$$S_{\text{ЦМ}}(f) = \frac{B_1 \cdot f}{f_0^2} + \frac{B_0}{f_0} \quad (2)$$

где f_0 – частота дискретизации;

f – отстройка от частоты несущего колебания;

B_1, B_0 – константы, зависящие от типа микросхемы [7].

Иностранные производители интегральных микросхем в Datasheet на свои изделия чаще всего записывают значения таких величин, как Normalized Phase Noise Floor и Normalized $1/f$ Noise. Это не что иное, как усредненное значение белого фазового шума и фазового фликкер-шума. В связи с этим становится возможным представление шумовых характеристик ЦМ в виде степенной функции (2) [8].

2. Применение степенного разложения к блокам схемы

СПМ внешних и внутренних воздействий в СЧ ИФАПЧ возможно представить в виде степенных функций отдельных частот для каждого конкретного элемента схемы:

$$S^{\Phi\text{НЧ}}(f) = \sum_{i=0}^4 \gamma_i^{\Phi\text{НЧ}} \cdot f^i, S^{\text{ЦМ}}(f) = \sum_{i=0}^4 \gamma_i^{\text{ЦМ}} \cdot f^i, S^{\text{ОГ}}(f) = \sum_{i=0}^4 \gamma_i^{\text{ОГ}} \cdot f^i, S^{\text{УГ}}(f) = \sum_{i=0}^4 \gamma_i^{\text{УГ}} \cdot f^i \quad (3)$$

где $S^{\text{ОГ}}(f)$ и $S^{\text{УГ}}(f)$ – СПМ девиаций фазы сигналов опорного и управляемого генераторов;

$S^{\text{ЦМ}}(f)$ – фазовый шум ЦМ, пересчитанный на его вход;

$S^{\Phi\text{НЧ}}(f)$ – шум ФНЧ;

γ_i – коэффициенты аппроксимации, определяемые из спецификации на используемые радиоэлементы.

Составим выражение, определяющее выходной уровень фазовых шумов. В качестве исходных данных возьмем линеаризованную схему СЧ, изображенную на рис. 2.

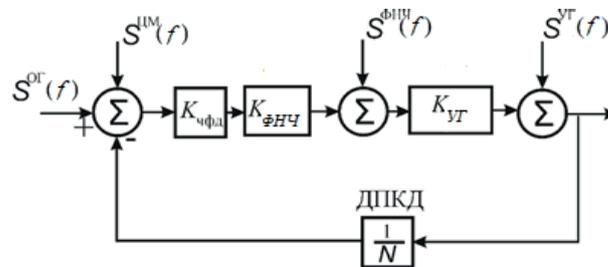


Рис. 2. Схема расчета выходного уровня шума в СЧ с ИФАПЧ.

На рис. 2 представлена типовая схема СЧ с ИФАПЧ. Для расчета передаточной функции всей схемы выразим комплексные коэффициенты передачи каждого блока через передаточные функции:

$$S(f) = (S^{\text{ОГ}}(f) + S^{\text{ЦМ}}(f)) \cdot |K_1(j\omega)|^2 + S^{\text{УГ}}(f) \cdot |K_2(j\omega)|^2 + S^{\Phi\text{НЧ}}(f) \cdot |K_3(j\omega)|^2 \quad (4)$$

$$K_1(j\omega) = \frac{G(j\omega) \cdot N}{1 + G(j\omega)}, K_2(j\omega) = \frac{1}{1 + G(j\omega)}, K_3(j\omega) = \frac{K_{\text{УГ}}}{j\omega \cdot (1 + G(j\omega))}, \quad (5)$$

$$G(j\omega) = \frac{K_{\text{чФД}}(j\omega) \cdot K_{\text{УГ}}(j\omega) \cdot K_{\text{ФНЧ}}(j\omega)}{N \cdot j\omega},$$

где $K_1(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи фазового шума сигнала ОГ;

$K_2(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи фазового шума сигнала УГ;

$K_3(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи шума ФНЧ;

$G(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи системы ИФАПЧ;

$K_{\text{чФД}}$ – крутизна характеристики ЧФД;

$K_{\text{УГ}}$ – крутизна характеристики УГ;

$K_{\text{ФНЧ}}$ – коэффициент передачи ФНЧ;

N – коэффициент деления делителя.

Проведем исследование типового синтезатора частоты, построенного на базе микросхемы ADF4118. Для этого составим модель СЧ, реализованного по типовой схеме, с указанием всех известных источников шума (рис. 3).

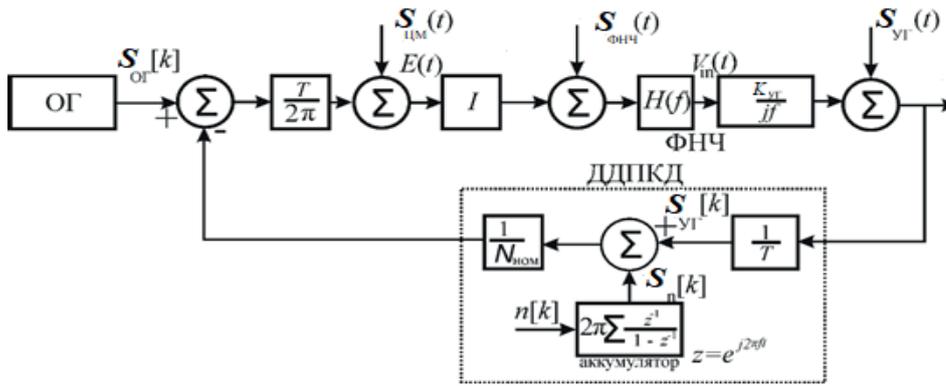


Рис. 3. Модель синтезатора частот в частотной области с известными источниками шума.

Выразим коэффициент передачи системы, изображенной на рис. 3. Согласно теории управления коэффициент замкнутой системы имеет вид:

$$G(f) = \frac{A(f)}{1 + A(f)}, \quad (6)$$

где $A(f)$ – коэффициент разомкнутой системы, который имеет вид:

$$A(f) = \left(\frac{1}{2\pi} \right) IH(f) \left(\frac{S_{уГ}}{jf} \right) \left(\frac{1}{N_{ном}} \right) \quad (7)$$

При этом передаточная функция аккумулятора ДДПКД для $f \ll \frac{1}{T}$ запишется, как:

$$\frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{e^{-j2\pi fT}}{1 - e^{-j2\pi fT}} \approx \frac{1 - j2\pi fT}{1 - (1 - j2\pi fT)} \approx \frac{1}{j2\pi fT} \quad (8)$$

Преобразуем модель, изображенную на рис. 3, к более удобному для расчета виду, представленному на рис. 4.

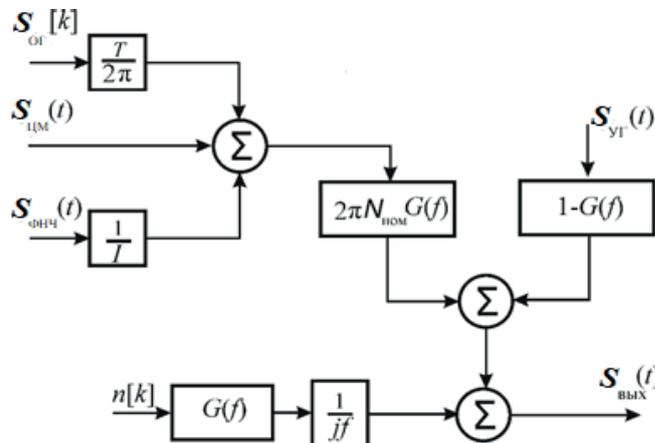


Рис. 4. Модель синтезатора частот для расчета шумовых характеристик.

При выборе пассивного петлевого фильтра следует иметь в виду, что наибольший вклад в итоговый уровень шума системы будет иметь используемое сопротивление [8].

Для генераторов одним из основных параметров является уровень шумов при отстройке от центральной частоты на определенную величину. При использовании таких данных возможно воссоздать характеристику распределения СПМ паразитных флукуаций фазы [9], таким образом, подобрав коэффициенты степенной функции. Для подтверждения теоретических выводов используем коэффициенты, приведенные в табл. 2 [10].

Таблица 2. Теоретические значения коэффициентов [10]

Компонент	Коэффициент γ_α	Значение
Опорный генератор	γ_2	10^{-14}
	γ_1	10^{-13}
	γ_0	10^{-10}
	γ_{-1}	10^{-7}
Цифровой модуль	γ_2	10^{-16}
	γ_1	10^{-13}
ФНЧ	γ_2	10^{-11}
Управляемый генератор	γ_2	10^{-14}
	γ_1	10^{-14}
	γ_0	10^{-10}
	γ_{-1}	10^{-5}

На рис. 5 изображен итоговый уровень моделирования паразитных флукуаций фазы на выходе СЧ. Как видно из рис. 5, наибольший вклад в итоговый уровень фазовых шумов в выходном сигнале СЧ вносит работа цифрового модуля.

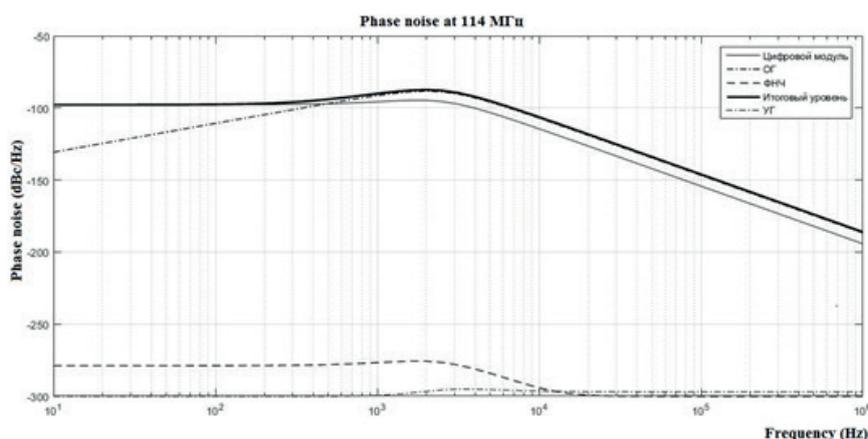


Рис. 5. Итоговый уровень шумов образованных работой компонентов схемы.

3. Сравнение полученных результатов моделирования

Сравним результаты, полученные с помощью представленного алгоритма, с результатами моделирования СЧ на микросхеме ADF4118 в узкоспециализированном пакете моделирования ADIsimPLL от фирмы Analog Devices [9] (рис. 6).

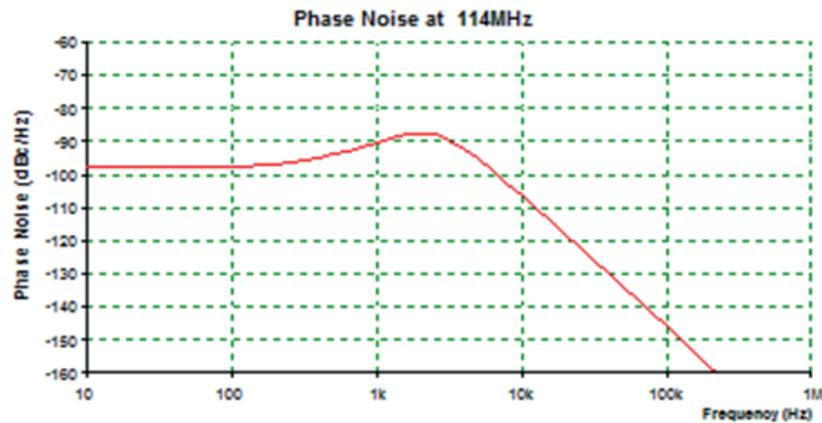


Рис. 6. Результат расчета фазовых шумов для СЧ, построенного на основе микросхемы ADF 4118 в программе ADIsimPLL.

Из этого сравнения (рис. 5 и 6) можно сделать вывод о целесообразности и простоте использования полученной модели при расчете фазовых шумов для интегральных микросхем различных производителей, не прибегая к использованию узкоспециализированного программного обеспечения.

Заключение

Представленная модель расчета уровня паразитных фазовых флуктуаций позволяет на этапе проектирования оценить уровень средней плотности мощности шума в выходном сигнале СЧ без использования специализированного программного обеспечения. Для использования модели достаточно определить структуру проектируемого СЧ и подходящую элементную базу.

Литература:

1. 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.
2. Norsworthy S.R., Schreier R., Temes G.C. Delta-Sigma Data Converters: Theory, Design, and Simulation. IEEE PRESS, 1997. P. 165–192.
3. Левин В.А., Малиновский В.Н., Романов С.К. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки частоты. М.: Радио и связь, 1989. 232 с.
4. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991. С. 9–13.
5. Limkumnerd S., Eungdamrong D. Mathematical models and simulations of phase noise in phase-locked loops // Songklanakarin J. Sci. Technol. 2007. V. 29. № 4. P. 1017–1028.
6. Манасевич В. Синтезаторы частот. Теория и проектирование: пер. с англ. / Под ред. А.С. Галина. М.: Связь, 1979. 384 с.
7. Шахтарин Б.И. Синтезаторы частот. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. С. 20–23.
8. Drucker E. Model PLL dynamics and phase-noise performance // Microwaves & RF. 2000. V. 39. № 2. P. 88–96.
9. Толкачев П.А. Методики увеличения качества спектра выходного сигнала для син-

тезатора частот косвенного синтеза с делителем с переменным коэффициентом деления // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 7. С. 309–313.

10. Woogeun Rhee, Ni Xu, Bo Zhou, Zhihua Wang. Fractional-N frequency synthesis: overview and practical aspects with FIR-embedded design // J. Semicond. Technol. and Sci. 2013. V. 13. № 2. P. 170–183.

References:

1. Kacharina E.G., Tolkachev P.A., Shakhtarin B.I. Polynomial model for computing noise levels in frequency synthesizers. *Vestnik MGTU imeni N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* (Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering). 2018; 2: 41-47. (in Russ.)

2. Norsworthy S.R., Schreier R., Temes G.C. Delta-Sigma Data Converters: Theory, Design, and Simulation. IEEE PRESS, 1997: 165-192.

3. Levin V.A., Malinovsky V.N., Romanov S.K. Frequency synthesizers with a pulse phase locked loop system. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1989. 232 p. (in Russ.)

4. Ryzhkov A.V., Popov V.N. Frequency synthesizers in radio technology. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1991: 9-13 (in Russ.)

5. Limkumnerd S., Eungdamrong D. Mathematical models and simulations of phase noise in phase-locked loops. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 2007; 29(4): 1017-1028.

6. Manasevich V. Frequency synthesizers. Theory and design. Moscow: Svyaz' Publ., 1979. 384 p. (in Russ.)

7. Shakhtarin B.I. Frequency Synthesizers. Moscow: Goryachaya liniya-Telecom Publ., 2007: 20-23. (in Russ.)

8. Drucker E. Model PLL dynamics and phase – noise performance. *Microwaves & RF.* 2000; 39(2): 88-96.

9. Tolkachev P.A. The increasing of output signal for the frequency synthesizers of indirect synthesis with a variable division coefficient divider. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* (Automation. Modern Technologies). 2017; 71(7): 309-313. (in Russ.)

10. Woogeun Rhee, Ni Xu, Bo Zhou, Zhihua Wang. Fractional-N frequency synthesis: overview and practical aspects with FIR-embedded design. *J. Semicond. Technol. and Sci.* 2013; 13(2): 170-183.

Об авторах:

Толкачев Павел Анатольевич, аспирант кафедры специального приборостроения и систем Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Сизых Вадим Витальевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры специального приборостроения и систем Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Стариковский Анатолий Иванович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Pavel A. Tolkachev, Postgraduate Student of the Chair of Special Instrumentation and Systems, Institute of Complex Security and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Vadim V. Sizykh, D.Sc. (Engineering), Docent, Professor of the Chair of Special Instrumentation and Systems, Institute of Complex Security and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Anatoly I. Starikovskiy, Ph.D. (Engineering), Docent, Professor of the Chair of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Для цитирования: Толкачев П.А., Сизых В.В., Стариковский А.И. Модель оценки уровня паразитных фазовых флуктуаций в выходном сигнале синтезатора частот // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 2. С. 39–48. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-39-48

For citation: Tolkachev P.A., Sizykh V.V., Starikovskiy A.I. Model of evaluating the level of parasitic phase fluctuations in the output signal of the synthesizer of frequencies. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(2): 39-48. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-39-48