

УДК 621.396

## Алгоритм определения параметров гибридных синтезаторов частот для обеспечения наименьшего уровня фазовых шумов выходного сигнала

Якименко К.А., Ромашов В.В.

При частотном планировании гибридных синтезаторов частот на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза зачастую возникает ситуация, когда сигнал с заданным значением выходной частоты можно достигнуть за счёт установки нескольких различных комбинаций параметров синтезатора (коэффициенты деления, коэффициенты умножения, коэффициенты передачи цифрового вычислительного синтезатора). При этом перед разработчиком стоит задача выбрать одну из этих комбинаций. Данная работа посвящена разработке алгоритма, позволяющего определить параметры гибридных синтезаторов частот, при установке которых гибридный синтезатор будет формировать выходной сигнал с наименьшим уровнем фазовых шумов. При работе алгоритма используются разработанные авторами математические модели спектральной плотности мощности фазовых шумов гибридных синтезаторов частот.

*Ключевые слова:* гибридный синтезатор частот, ЦВС, ФАПЧ, фазовый шум, частотное планирование.

### Введение

Гибридные синтезаторы частот на основе прямого цифрового (цифровые вычислительные синтезаторы – ЦВС) и косвенного (системы фазовой автоподстройки частоты – ФАПЧ) методов синтеза находят широкое применение в качестве малощумящих формирователей гармонических сигналов [1–4]. Такие синтезаторы формируют широкий диапазон выходных частот с малым шагом перестройки, обеспечивая при этом низкий уровень фазовых шумов и малое количество дискретных побочных составляющих в спектре выходного сигнала. Для анализа шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот используются математические модели спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов на основе степенных полиномов [5–9]. Данные модели позволяют рассчитать уровень спектральной плотности мощности фазовых шумов в зависимости от частоты отстройки для заданных значений опорной и выходной частот синтезатора.

При проектировании гибридного синтезатора на основе ФАПЧ и ЦВС перед разработчиком стоит задача рассчитать частотные соотношения в структуре системы ФАПЧ. Исходными данными для расчета, как правило, являются значения входной (опорной) частоты, частоты сравнения в фазовом дискриминаторе, выходной частоты синтезатора [10–11]. Однако, для некоторых типов ги-

бридных синтезаторов (например, для гибридного синтезатора с ЦВС в качестве генератора подставки [12] или для гибридного синтезатора, использующего образы основной частоты ЦВС [13–16]) достигнуть требуемое значение выходной частоты можно при различных комбинациях параметров синтезатора (под словом «параметры синтезатора» в данной работе подразумеваются значения коэффициентов деления делителей частот, коэффициентов умножения умножителей частот, коэффициентов передачи ЦВС). Количество таких комбинаций может достигать нескольких тысяч. Поэтому актуальной задачей представляется выбрать из этого набора комбинаций одну, при установке, которой синтезатор будет формировать требуемый сигнал с наименьшим уровнем фазовых шумов. Таким образом, целью данной работы является разработка на основе математических моделей СПМ фазовых шумов алгоритма определения параметров гибридных синтезаторов, обеспечивающих наименьший уровень фазовых шумов выходных сигналов.

### Разработка алгоритма

Известны четыре обобщённых типа гибридных синтезаторов частот: гибридный синтезатор с ЦВС в качестве опорного генератора ФАПЧ, гибридный синтезатор с ЦВС в цепи обратной связи ФАПЧ, гибридный синтезатор с ЦВС в качестве генератора подставки

ФАПЧ и гибридный синтезатор, использующий образы основной частоты ЦВС. Для первых двух типов алгоритм выбора параметров не требуется, поскольку в структуре синтезаторов присутствуют лишь делители частот, следовательно, имеется всего один набор параметров синтезаторов, при установке которых достигается значение требуемой выходной частоты.

Рассмотрим математические модели шумовых характеристик гибридного синтезатора с ЦВС в качестве генератора подставки ФАПЧ и гибридного синтезатора, использующего образы основной частоты ЦВС. Математическая модель СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора с ЦВС в качестве генератора подставки ФАПЧ имеет вид:

$$S_{\text{СП}}(F) = \left[ \frac{S_{\text{ГОЧ}}(F)}{N_1^2} + S_{\text{ДЧ1}}(F) + S_{\text{ФД}}(F) + S_{\text{ФНЧ}}(F) + S_{\text{ДЧ2}}(F) + \frac{1}{N_2^2} \cdot [S_{\text{СМ}}(F) + K_{\text{ЦВС}}^2 \times (S_{\text{ГОЧ}}(F) \cdot n_1^2 + S_{\text{УЧ}}(F)) + S_{\text{ЦВС}}(F)] \right] \times |H_{31}(j2\pi F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) \cdot |H_{32}(j2\pi F)|^2, \quad (1)$$

где  $S_{\text{ГОЧ}}(F)$ ,  $S_{\text{ДЧ1}}(F)$ ,  $S_{\text{ДЧ2}}(F)$ ,  $S_{\text{ФД}}(F)$ ,  $S_{\text{ФНЧ}}(F)$ ,  $S_{\text{СМ}}(F)$ ,  $S_{\text{ЦВС}}(F)$ ,  $S_{\text{ГУН}}(F)$  – модели СПМ фазовых шумов делителя частоты ДЧ1 с коэффициентом деления  $N_1$ , делителя частоты ДЧ2 с коэффициентом деления  $N_2$ , фазового дискриминатора, петлевого ФНЧ, смесителя, умножителя частоты с коэффициентом умножения  $n_1$ , ЦВС с коэффициентом передачи  $K_{\text{ЦВС}}$ , генератора, управляемого напряжением, соответственно;  $H_{31}(j2\pi F) = H_1(j2\pi F)/(1 + H_1(j2\pi F))$  – передаточная функция кольца ФАПЧ по внешним шумам,  $H_{32}(j2\pi F) = 1/(1 + H_1(j2\pi F))$  – передаточная функция кольца ФАПЧ по внутренним шумам,

$H_1(j2\pi F) = \frac{1}{N_2} \left( \frac{F_{\text{ФНЧ}}(j2\pi F) \cdot s_{\text{ФД}} \cdot S_{\text{ГУН}}}{j2\pi F} \right)$  – передаточная функция разомкнутого кольца ФАПЧ,  $F_{\text{ФНЧ}}(j2\pi F)$  – передаточная функция

ФНЧ,  $s_{\text{ФД}}$  – крутизна дискриминационной характеристики фазового дискриминатора;  $S_{\text{ГУН}}$  – крутизна регулировочной характеристики генератора, управляемого напряжением.

Математическая модель СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора, использующего образы основной частоты ЦВС, имеет вид:

$$S_{\text{обр}}(F) = \left[ \frac{S_{\text{ГОЧ}}(F)}{N_1^2} + S_{\text{ДЧ1}}(F) + S_{\text{ФД}}(F) + S_{\text{ФНЧ}}(F) + S_{\text{ДЧ2}}(F) + \frac{1}{N_2^2} \cdot [S_{\text{СМ}}(F) + |n + K_{\text{ЦВС}}|^2 \times (S_{\text{ГОЧ}}(F) \cdot n_1^2 + S_{\text{УЧ}}(F)) + S_{\text{ЦВСобр}}(F)] \right] \times |H_{31}(j2\pi F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) \cdot |H_{32}(j2\pi F)|^2, \quad (2)$$

где  $n$  – номер используемого образа,  $S_{\text{ЦВСобр}}(F)$  – математическая модель СПМ фазовых шумов ЦВС, работающего на образе основной частоты.

Математическая модель (1) при фиксированном значении частоты отстройки  $F = \text{const}$  зависит от переменных  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $n_1$ ,  $K_{\text{ЦВС}}$ :

$$S_{\text{СП}}(N_1, N_2, n_1, K_{\text{ЦВС}}) = [A(N_1) + B(N_2, n_1, K_{\text{ЦВС}})] \times |H_{31}(N_2)|^2 + C \cdot |H_{32}(N_2)|^2, \quad (3)$$

где

$$A(N_1) = \frac{S_{\text{ГОЧ}}}{N_1^2} + S_{\text{ДЧ1}} + S_{\text{ФД}} + S_{\text{ФНЧ}} + S_{\text{ДЧ2}};$$

$$B(N_2, n_1, K_{\text{ЦВС}}) = \frac{1}{N_2^2} \cdot [S_{\text{СМ}} + K_{\text{ЦВС}}^2 \cdot (S_{\text{ГОЧ}} \cdot n_1^2 + S_{\text{УЧ}}(F)) + S_{\text{ЦВС}}(n_1, K_{\text{ЦВС}})];$$

$$C = S_{\text{ГУН}} = \text{const}.$$

Математическая модель (2) при фиксированном значении частоты отстройки  $F = \text{const}$  зависит от переменных  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $n_1$ ,  $n$ ,  $K_{\text{ЦВС}}$ .

$$S_{\text{обр}}(N_1, N_2, n_1, n, K_{\text{ЦВС}}) = \\ = [A(N_1) + D(N_2, n_1, n, K_{\text{ЦВС}})] \times \\ \times |H_{31}(N_2)|^2 + C \cdot |H_{32}(N_2)|^2, \quad (4)$$

где

$$D(N_2, n_1, K_{\text{ЦВС}}) = \frac{1}{N_2^2} \cdot [S_{\text{СМ}} + |n + K_{\text{ЦВС}}|^2 \times \\ \times (S_{\text{ГОЧ}} \cdot n_1^2 + S_{\text{УЧ}}(F)) + S_{\text{ЦВСобр}}(n_1, n, K_{\text{ЦВС}})].$$

Алгоритм определения параметров, обеспечивающих наименьший уровень фазовых шумов, сводится к расчёту и сравнению значений СПМ фазовых шумов по математическим моделям при всех возможных комбинациях параметров гибридных синтезаторов, обеспечивающих формирование заданных частот:

*Шаг 1. Ввод набора параметров гибридного синтезатора, обеспечивающих формирование заданной выходной частоты.*

Задаётся набор Par из всех возможных параметров гибридного синтезатора (общим количеством –  $i$ ), получившихся при частотном планировании, при установке которых гибридный синтезатор сформирует сигнал с заданной выходной частотой.

Для гибридного синтезатора с ЦВС в качестве генератора подставки ФАПЧ массив Par будет состоять из параметров  $(N_1, N_2, n_1, K_{\text{ЦВС}})$

$$\text{Par} = \begin{bmatrix} (N_1)_1 & (N_1)_2 & \dots & (N_1)_i \\ (N_2)_1 & (N_2)_2 & \dots & (N_2)_i \\ (n_1)_1 & (n_1)_2 & \dots & (n_1)_i \\ (K_{\text{ЦВС}})_1 & (K_{\text{ЦВС}})_2 & \dots & (K_{\text{ЦВС}})_i \end{bmatrix}.$$

Для гибридного синтезатора, использующего образы основной частоты ЦВС, массив Par дополняется номером образа  $n$

$$\text{Par} = \begin{bmatrix} (N_1)_1 & (N_1)_2 & \dots & (N_1)_i \\ (N_2)_1 & (N_2)_2 & \dots & (N_2)_i \\ (n_1)_1 & (n_1)_2 & \dots & (n_1)_i \\ (n)_1 & (n)_2 & \dots & (n)_i \\ (K_{\text{ЦВС}})_1 & (K_{\text{ЦВС}})_2 & \dots & (K_{\text{ЦВС}})_i \end{bmatrix}.$$

*Шаг 2. Подпрограмма расчета значений СПМ фазовых шумов на заданных частотах отстройки F от несущей.*

На данном этапе параметры из массива Par поочередно подставляются в соответствующие математические модели (3) или (4). Для каждой комбинации параметров рассчитываются значения СПМ фазовых шумов для заданных значений отстроек от несущей ( $F_1, F_2, \dots, F_j$ ). Полученные результаты записываются в двумерный массив данных SGC:

$$\text{SGC} = \begin{bmatrix} \text{SGC}_{11} & \text{SGC}_{12} & \text{SGC}_{13} & \text{SGC}_{1i} \\ \text{SGC}_{21} & \text{SGC}_{22} & \text{SGC}_{23} & \text{SGC}_{2i} \\ \text{SGC}_{31} & \text{SGC}_{32} & \text{SGC}_{33} & \text{SGC}_{3i} \\ \text{SGC}_{j1} & \text{SGC}_{j2} & \text{SGC}_{j3} & \text{SGC}_{ji} \end{bmatrix}.$$

*Шаг 3. Подпрограмма сравнения и выбора вариантов, при которых обеспечивается наименьший уровень фазовых шумов.*

На данном этапе в полученном массиве SGC происходит сравнение значений по столбцам. В случае, когда все значения одного столбца больше всех значений другого столбца, столбец с большими значениями отсеивается. В результате остаётся столбец, с наименьшими значениями СПМ фазовых шумов, либо несколько столбцов, в которых значения при одних отстройках больше, чем значения на аналогичных отстройках, а при других меньше.

*Шаг 4. Подпрограмма выбора параметров.*

На данном этапе необходимо решить, какой набор параметров обеспечивает наименьший уровень фазовых шумов, то есть из оставшихся столбцов выбрать один по определённому критерию. Данный критерий зависит от области применения гибридного синтезатора. Для одних применений критичным является уровень фазовых шумов на ближних отстройках, для других – на дальних. Поэтому выбор критерия на данном этапе определяется пользователем.

Алгоритм был реализован в виде подпрограммы, входящей в состав программного комплекса, разработанного в [17]. Интерфейс программного комплекса представлен на рис. 1.

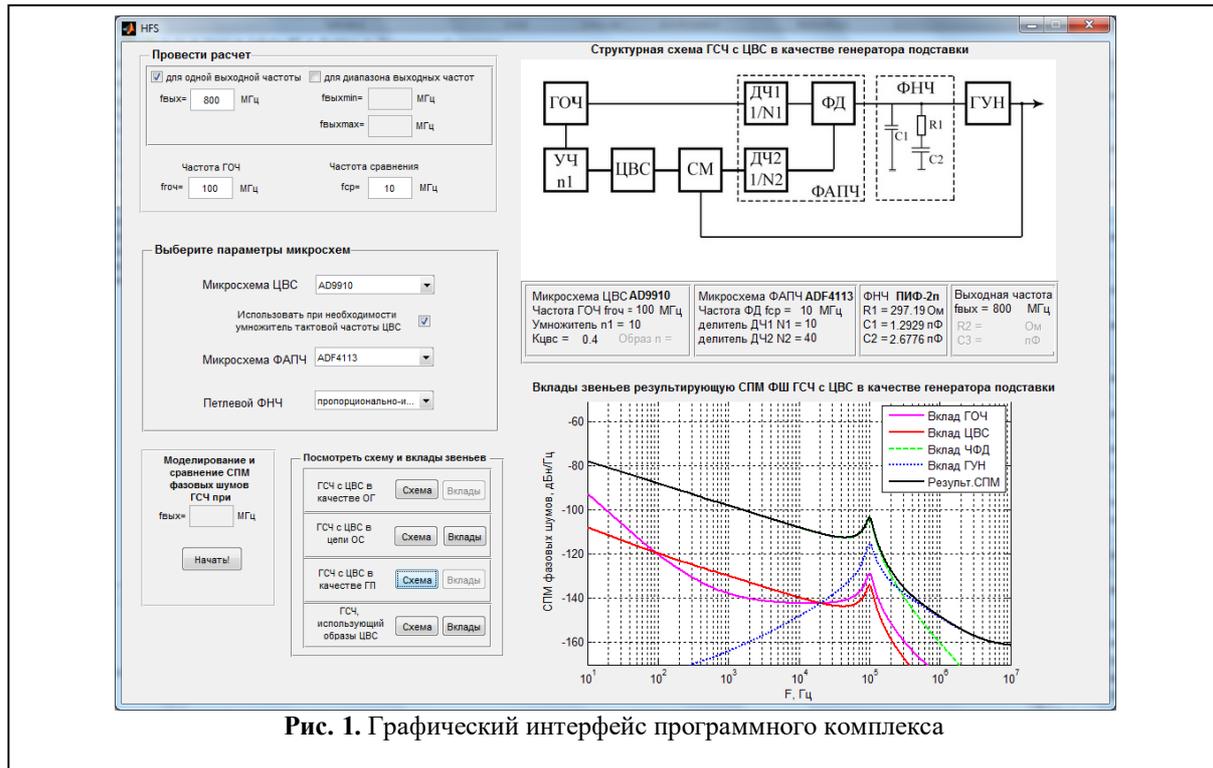


Рис. 1. Графический интерфейс программного комплекса

**Пример определения параметров, обеспечивающих наименьший уровень фазовых шумов, с помощью разработанного алгоритма**

Для иллюстрации работы алгоритма определим параметры гибридного синтезатора, использующего образы основной частоты ЦВС, при которых он обеспечивает наименьший уровень фазовых шумов для следующих исходных данных: выходная частота  $f_{ВЫХ} = 3100$  МГц, опорная (входная) частота  $f_{ГОЧ} = 100$  МГц, частота сравнения ФД  $f_{СР} = 10$  МГц, максимальная тактовая частота ЦВС  $f_{ЦВС} = 2500$  МГц, максимально допустимый номер образа  $n_{max} = 3$ . В качестве диапазона изменения коэффициента передачи ЦВС по (3.5) для обеспечения хорошей фильтрации был выбран диапазон  $K_{ЦВС} \in [0,15; 0,35]$ . Поскольку частота сравнения задана в исходных данных, коэффициент деления  $N_1 = 10$  для всех возможных комбинаций. Рассмотрим выполнение алгоритма определения оптимальных параметров для минимизации уровня фазовых шумов при следующих значениях отстройки  $F_1 = 10$  Гц,  $F_2 = 1$  кГц,  $F_3 = 1$  МГц.

Таблица 1. Значения комбинаций параметров гибридного синтезатора

№	$n_1$	$N_2$	$n$	$K_{ЦВС}$
1	1	277	3	0,3000
2	1	278	3	0,2000
3	1	282	-3	0,2000

773	24	154	-1	0,3500
774	25	1	1	0,2360
775	25	2	1	0,2320

844	25	146	-1	0,3440
845	25	147	-1	0,3480

Таблица 2. Значения СПМ фазовых шумов для соответствующих параметров из таблицы 1

№	Значения СПМ фазовых шумов, дБн/Гц		
	$F_1 = 10$ Гц	$F_2 = 1$ кГц	$F_3 = 1$ МГц
1	-61,2043	-81,2744	-137,0992
2	-61,1754	-81,2444	-137,0994
3	-61,0539	-81,1216	-137,0998

773	-77,9678	-116,4375	-130,0148
774	-77,9829	-115,6308	-132,5512
775	-77,9926	-114,6948	-133,9578

844	-66,6863	-86,8457	-137,0830
845	-66,6293	-86,7864	-137,0832

**Таблица 3.** Набор параметров, определяющих наименьший уровень СПМ фазовых шумов для заданных отстроек

№	F	$n_1$	$N_2$	$n$	$K_{ЦВС}$	Значения СПМ фазовых шумов, дБн/Гц
1	10 Гц	25	5	1	0,2200	-77,9968
2	1 кГц	25	1	1	0,2360	-116,9860
3	1 МГц	1	303	-1	0,3000	-137,1016

Используя математический аппарат из [10] получаем 845 комбинаций целочисленных значений параметров гибридного синтезатора. Данные комбинации представлены в таблице 1. Таким образом, для формирования гибридным синтезатором выходной частоты  $f_{\text{ВЫХ}} = 3100$  МГц необходимо установить  $N_1 = 10$  и любую комбинацию параметров ( $N_2$ ,  $n_1$ ,  $n$ ,  $K_{ЦВС}$ ), представленных в таблице 1.

По выполнению алгоритма на первом шаге были заданы комбинации параметров гибридного синтезатора из таблицы 1. На втором шаге по (3) были определены значения СПМ фазовых шумов для исходных параметров гибридного синтезатора при заданных частотах отстройки. Получившиеся значения сведены в таблицу 2.

На третьем шаге определяется набор параметров, который обеспечивает формирование гибридным синтезатором сигнала с заданной частотой с наименьшим значением

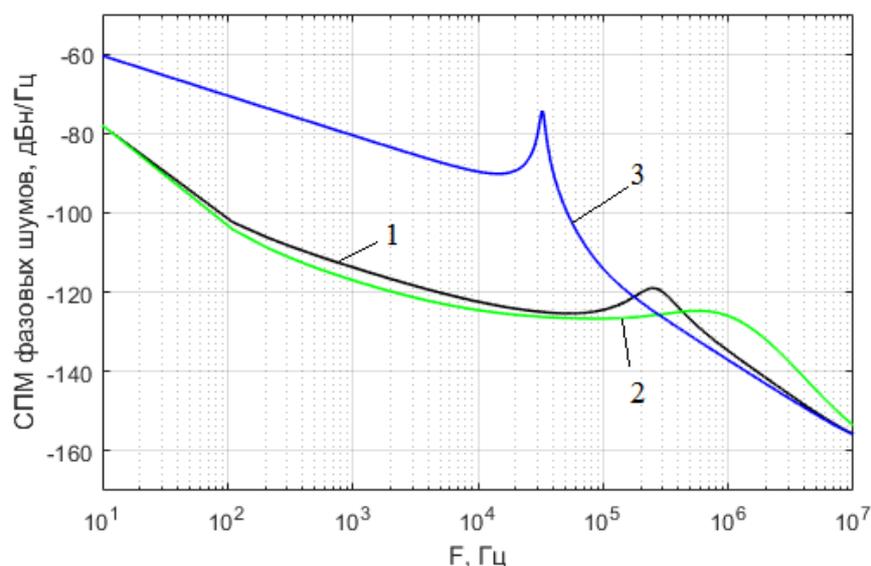
СПМ фазовых шумов для каждого заданного значения отстройки от несущей. Наборы параметров представлены в таблице 3.

На четвертом шаге необходимо по критерию, заданному пользователем, выбрать наиболее приемлемые параметры. Для наглядности построим по (2) шумовые характеристики для параметров из таблицы 3 (рис. 2).

В соответствии с рис. 2, наименьший уровень СПМ фазовых шумов на отстройках вблизи несущей гибридный синтезатор, использующий образы основной частоты ЦВС, обеспечивает при параметрах  $n_1 = 25$ ,  $N_2 = 1$ ,  $n = 1$ ,  $K_{ЦВС} = 0,2360$ .

### Заключение

Разработанный алгоритм позволяет оптимизировать частотные соотношения в структуре гибридного синтезатора частот за счёт выбора определенных значений коэффициентов деления, умножения, коэффициентов передачи ЦВС. При установке данных параметров достигается наименьший уровень фазовых шумов. Алгоритм был реализован в виде подпрограммы, входящей в состав специализированного программного комплекса, предназначенного для частотного планирования и структурного проектирования гибридных синтезаторов частот и анализа их шумовых



**Рис. 2.** СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора частот для параметров из таблицы 3 (обозначения соответствуют номерам строк в таблице 3)

характеристик.

### Литература

1. Chenakin A. Frequency Synthesizers: From Concept to Product. New York: Artech House, 2010. 235 p.

2. Ченакин А. Частотный Синтез: Текущие Решения и Новые Тенденции // Microwave Journal. Май, 2007. С. 256–266.

3. 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. DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959400.

4. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A., Doktorov A.N. Wide-band hybrid frequency synthesizer with improved noise performance // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 - Proceedings. № 1. 2018. С. 1–4. DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337224.

5. Romashov V.V., Yakimenko K.A. Modelling and comparing of phase noise curves of hybrid synthesizers // Proc. of the 2015 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). – Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 20–22, 2015. ISBN: 978-147997102-2. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147198.

6. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Докторов А.Н., Якименко К.А. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 1. С. 5–20.

7. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. Simulation of noise curves of the new integrated DDS from Analog Devices // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2013. Krasnoyarsk, DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693574.

8. 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.

9. Ромашов В.В., Якименко К.А., Якименко К.А., Докторов А.Н., Ромашова Л.В. Экспериментальное исследование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза // Вестник Поволжского государственного техноло-

**Поступила 10 июня 2018 г.**

гического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2017. № 1. С. 6–17.

10. Ромашов В.В., Якименко К.А. Разработка математического аппарата для частотного планирования гибридных синтезаторов частот // Проектирование и технология электронных средств. 2016. № 3. С. 3–9.

11. Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Частотное планирование формирователей сигналов радиосистем на основе цифровых вычислительных синтезаторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 4. С. 10–15.

12. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Якименко К.А. Исследование шумовых характеристик гибридного синтезатора частот на основе однокольцевой ИФАПЧ со смесителем и цифрового вычислительного синтезатора // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 4 (12). С. 23–29.

13. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Якименко К.А. Применение образов основной частоты ЦВС в гибридных синтезаторах частот // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. №3. С. 19–24.

14. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Якименко К.А., Докторов А.Н., Овчинников Р.В. Снижение уровня фазовых шумов гетеродинов современных анализаторов спектра при применении образов основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов // Измерительная техника. 2018. № 5. С. 65–68.

15. Romashov V.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. The use of images of DDS fundamental frequency for high-frequency signals formation // CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology. Conference Proceedings. 2014. Pp. 310–311. DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959408.

16. Ромашов В.В., Храмов К.К. Формирователи сетки опорных частот возбудителя передатчика с использованием образов основной частоты // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2011. № 13. С. 44–47.

17. 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.

In frequency planning of hybrid frequency synthesizers based on direct digital and indirect synthesis methods, there is often a situation when a signal with a given value of the output frequency can be achieved by setting several different combinations of synthesizer parameters (division coefficients, multiplication coefficients, transmission coefficients of a digital computing synthesizer). At the same time, the developer has a task to choose one of these combinations. This work is devoted to the development of an

algorithm that allows determining the parameters of hybrid frequency synthesizers, the installation of which the hybrid synthesizer will form the output signal with the lowest level of phase noise. When the algorithm used was developed by the authors mathematical model of the power spectral density of phase noise of a hybrid synthesizer of frequencies.

*Key words:* hybrid frequency synthesizer, DDS, PLL, phase noise, frequency planning.

---

*Якименко Кирилл Александрович* – инженер кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* yakimenko.kirill@yandex.ru

*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, д. 23.