

## Формирование и усиление сигналов

DOI 10.24412/2221-2574-2023-3-53-60

УДК 621.396

### ОПТИМИЗАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБРИДНЫХ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

**Якименко Кирилл Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* [yakimenko.kirill@yandex.ru](mailto:yakimenko.kirill@yandex.ru)

**Ромашов Владимир Викторович**

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

*E-mail:* [romashovmurom@mail.ru](mailto:romashovmurom@mail.ru)

**Докторов Андрей Николаевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* [doctorov\\_a\\_n@mail.ru](mailto:doctorov_a_n@mail.ru)

*Адрес:* 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

*Аннотация:* Формирователи сигналов современных телекоммуникационных систем должны обеспечивать высокое частотное разрешение, а также обладать хорошими спектральными и шумовыми характеристиками. Особенностью синтезаторов частот на основе быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) является то, что входящая в состав устройства система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) за счёт собственных фильтрационных свойств позволяет уменьшить количество и уровень проникающих в выходной сигнал синтезатора дискретных побочных спектральных составляющих (ДПСС), генерирующихся на выходе ЦАП из-за усечения кода фазы, ошибок некротности и квантования и т.п. Однако в некоторых случаях ДПСС всё равно проникают в полосу пропускания петлевого фильтра нижних частот. В данной статье предлагается алгоритм, позволяющий определить оптимальные частотные соотношения в структуре синтезаторов на основе быстродействующего ЦАП при формировании сигналов в диапазоне частот. Алгоритм использует математические модели выходных сигналов быстродействующего ЦАП в специальных режимах работы. В результате работы предложенного алгоритма из всех возможных комбинаций коэффициентов передачи составных блоков синтезатора выбираются те, при которых минимизируется вероятность проникновения ДПСС в спектр выходного сигнала синтезатора частот.

*Ключевые слова:* быстродействующий цифро-аналоговый преобразователь, ЦАП, прямой цифровой синтез, дискретные побочные составляющие спектра, алгоритм.

#### Введение

Частотный спектр сигналов, формируемых синтезаторами частот, помимо спектрального компонента на основной частоте, содержит шумовую составляющую и некоторое количество дискретных побочных спектральных составляющих (ДПСС) [1–3]. Появление ДПСС в спектре выходного сигнала негативно влияет

на работу радиосистемы (уменьшается дальность действия, возрастает уровень боковых лепестков и т.п.). В связи с этим, разработчикам синтезаторов при проектировании следует предпринимать меры для исключения ДПСС в выходном сигнале.

Для количественной оценки ДПСС используется параметр SFDR (англ., Spurious-Free

Dynamic Range) — динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих, — безразмерная величина, равная отношению мощности несущей к мощности максимального побочного спектрального компонента [4]. Высококачественные синтезаторы частот, используемые в современных радиосистемах (5G, измерительная техника, системы радиолокации и др.), обеспечивают уровень SFDR до 80–90 дБ [1, 2].

Как правило, большое количество ДПСС возникает в спектре выходного сигнала синтезаторов на основе прямого цифрового метода синтеза [5]. Синтезаторы косвенного метода синтеза (на основе систем фазовой автоподстройки частоты) обеспечивают относительно «чистый» спектр за счёт применения петлевого ФНЧ [6]. В гибридных синтезаторах частот на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза [7–10] существует вероятность проникновения ДПСС, генерируемых прямым цифровым синтезатором, в полосу пропускания петлевого ФНЧ. Целью данной работы является разработка алгоритма оптимизации спектральных характеристик гибридных синтезаторов частот на основе быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей.

### Частотное планирование гибридного синтезатора на основе быстродействующего ЦАП

На рис. 1 представлена структурная схема гибридного синтезатора частот на основе быстродействующего цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) [8].

Гибридный синтезатор представляет собой

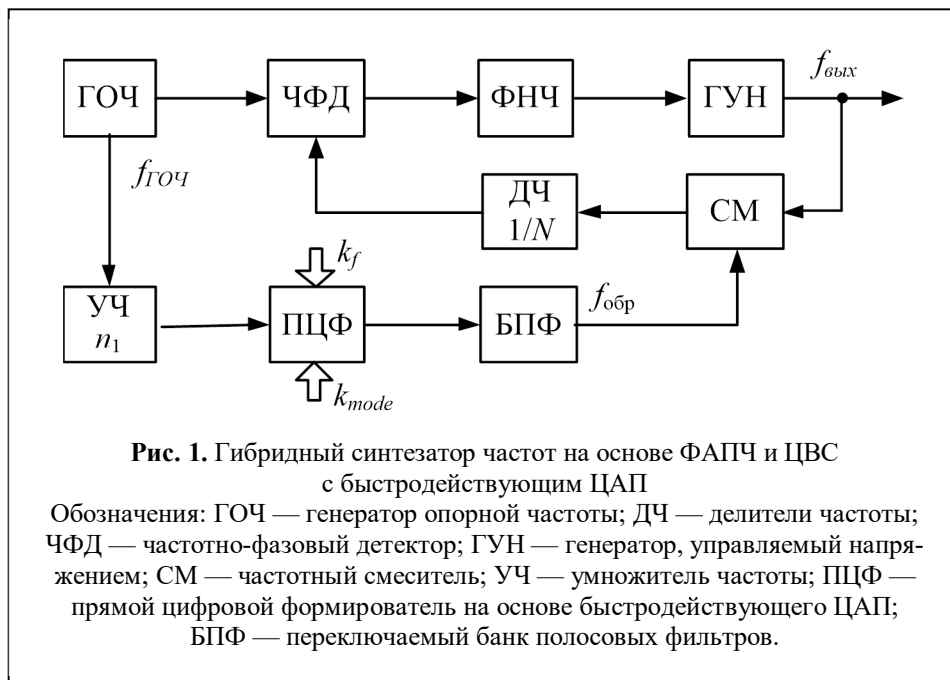


Рис. 1. Гибридный синтезатор частот на основе ФАПЧ и ЦВС с быстродействующим ЦАП

Обозначения: ГОЧ — генератор опорной частоты; ДЧ — делители частоты; ЧФД — частотно-фазовый детектор; ГУН — генератор, управляемый напряжением; СМ — частотный смеситель; УЧ — умножитель частоты; ПЦФ — прямой цифровой формирователь на основе быстродействующего ЦАП; БПФ — переключаемый банк полосовых фильтров.

систему ФАПЧ, в цепь обратной связи которой включен смеситель, на который подаётся сигнал с прямого цифрового синтезатора, образованного быстродействующим ЦАП. Подробное описание принципа работы приведено в [9]. Особенностью данного синтезатора является то, что быстродействующий ЦАП работает в специальных режимах (NRZ, RZ, RF), за счёт чего существенно улучшаются шумовые характеристики.

Выходная частота представленного гибридного синтезатора определяется по формуле

$$f_{\text{вых}} = f_{\text{ГОЧ}} \left( N + n_1 \left\lfloor K_{\text{ЦАП}} + n \right\rfloor \right), \quad (1)$$

где  $f_{\text{ГОЧ}}$  — частота, формируемая ГОЧ;  $N$  — коэффициент деления ДЧ;  $n_1$  — коэффициент умножения УЧ;  $K_{\text{ЦАП}}$  — коэффициент передачи ЦАП по основной частоте;  $n$  — номер образа основной частоты.

В соответствии с (1), выходная частота синтезатора зависит от четырёх параметров, то есть заданную частоту синтезатор может сформировать при различных комбинациях коэффициентов.

При этом, частотные соотношения в структуре гибридного синтезатора влияют на уровень фазовых шумов, а также на ДПСС, возникающие в спектре выходного сигнала. Одним

из основных источников ДПСС является прямой цифровой формирователь на основе быстродействующего ЦАП.

Прямой цифровой формирователь сигналов, основанный на быстродействующем ЦАП, содержит:

- аккумулятор фазы (цифровое устройство, генерирующее с каждым тактом код фазы синусоиды выходного сигнала);
- преобразователь кода фазы в код амплитуды (ПЗУ, содержащее в ячейках памяти значения амплитуды выходного сигнала);
- быстродействующий ЦАП, работающий в специальных режимах работы (NRZ, RZ, RF).

Можно выделить несколько причин возникновения ДПСС в спектре выходного сигнала прямого цифрового формирователя:

1. Дискретизация выходного сигнала — результат цифро-аналогового преобразования (проявляется в виде возникновения образов — зеркальных отображений спектральных компонентов относительно тактовой частоты).

2. Усечение кода фазы, которое определяется отбрасыванием младших бит аккумулятора фазы на величину  $b$  при их передаче к ПЗУ для уменьшения объема используемой памяти.

3. Ошибки квантования из-за конечной разрядности ЦАП.

Математическая модель выходного сигнала ЦВС в режиме NRZ, в которой учтены эффекты дискретизации, а также усечение кода фазы и ошибки квантования, имеет вид

$$sNRZ_i = \frac{1}{Q} \text{trunc} \left[ Q \sin \left( 2\pi \frac{2^b}{2^p} \text{trunc} \left( \frac{Ki\Delta t}{2^b} \right) \right) \right], \quad (2)$$

где  $i$  — отсчеты времени;  $Q$  — число уровней квантования;  $\text{trunc}(x)$  — операция выделения целой части числа  $x$ ;  $\Delta t < \frac{1}{4f_T}$  — интервал дискретизации для моделирования;

$K = \text{round} \left( 2^p \cdot \frac{f_{осн}}{f_T} \right)$  — код синтезируемой частоты;  $\text{round}(x)$  — оператор округления числа  $x$  до ближайшего целого;  $p$  — разряд-

ность аккумулятора фазы;  $f_{осн}$  — основная частота формирователя;  $f_T$  — тактовая частота формирователя.

В специальных режимах работы быстродействующего ЦАП восходящим и нисходящим фронтами тактового сигнала с помощью логического устройства осуществляется управление установленными на выходе ЦАП токовыми ключами. В результате в режиме RZ через каждую половину периода амплитудное значение выходного сигнала сбрасывается в ноль, а в режиме RF через каждую половину периода амплитудное значение выходного сигнала принимает противоположное значение. На основании этого для режимов RZ и RF математическую модель выходного сигнала ЦАП можно записать в следующем виде

$$SRZ_i = \begin{cases} sNRZ_i, & 0 \leq i \cdot \Delta t \leq \frac{1}{2f_T}, \\ 0, & \frac{1}{2f_T} < i \cdot \Delta t \leq \frac{1}{f_T}; \end{cases} \quad (3)$$

$$SRF_i = \begin{cases} sNRZ_i, & 0 \leq i \cdot \Delta t \leq \frac{1}{2f_T}, \\ -sNRZ_i, & \frac{1}{2f_T} < i \cdot \Delta t \leq \frac{1}{f_T}. \end{cases} \quad (4)$$

В качестве примера по моделям (2)–(4) построены спектры выходных сигналов для режимов работы ЦАП при  $p = 21$ ,  $a = 7$ ,  $Q = 256$ ,  $f_T = 1000$  МГц. На рис. 2 представлены спектры при  $K_{ЦАП} = 0,1781$ ; на рис. 3 — при  $K_{ЦАП} = 0,1489$ ; на рис. 4 — при  $K_{ЦАП} = 0,125$ .

По полученным спектрам видно, что уровень и количество побочных дискретных спектральных составляющих существенно зависят от коэффициента передачи ЦАП по частоте. В спектре полностью отсутствуют ДПСС, если коэффициент передачи ЦАП равен  $1/2^l$ , где  $l = 2, 3, 4 \dots$

Таким образом, выбрав верные частотные соотношения в структуре синтезатора, можно подобрать оптимальный коэффициент передачи, который обеспечивает наименьшее количество и наименьший уровень дискретных побочных спектральных составляющих.

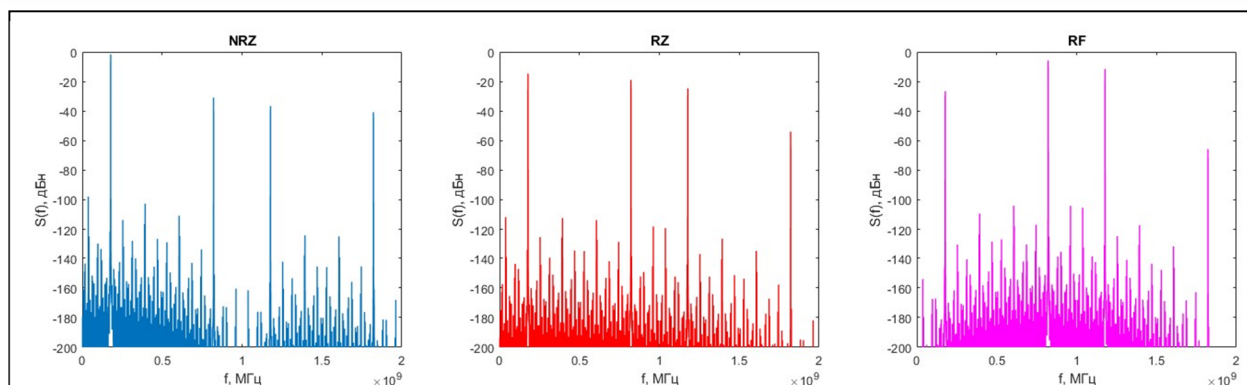


Рис. 2. Спектры выходных сигналов ЦАП в различных режимах работы при  $K_{\text{ЦАП}} = 0,1781$

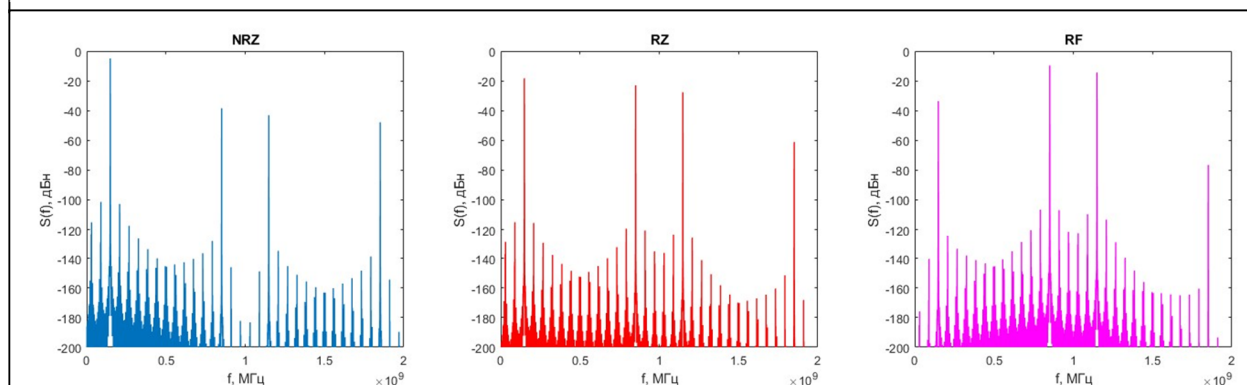


Рис. 3. Спектры выходных сигналов ЦАП в различных режимах работы при  $K_{\text{ЦАП}} = 0,1489$

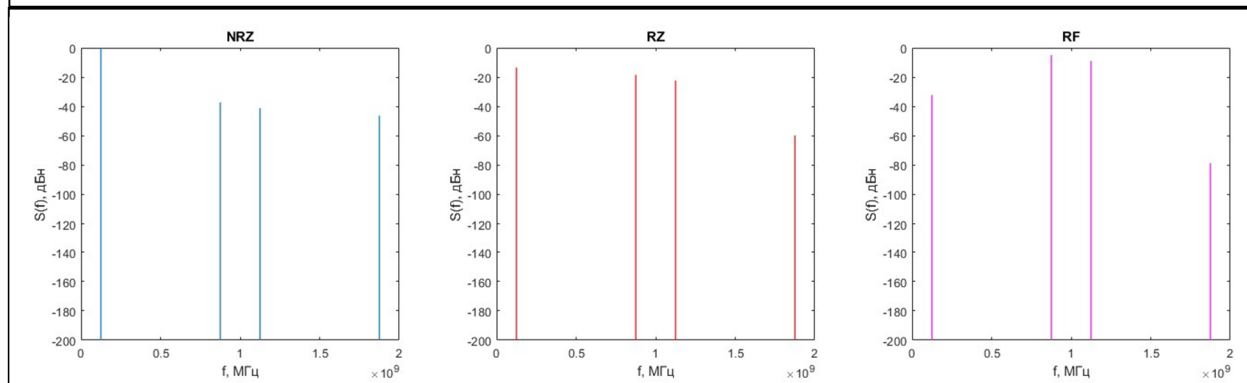


Рис. 4. Спектры выходных сигналов ЦАП в различных режимах работы при  $K_{\text{ЦАП}} = 0,125$

### Алгоритм оптимизации спектральных характеристик гибридных синтезаторов частот

На основании предложенных моделей выходного сигнала ЦАП был разработан алгоритм, позволяющий рассчитать оптимальные частотные соотношения в структуре гибридного синтезатора. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 5.

Алгоритм предполагает последовательное

выполнение следующих этапов.

Первый этап. Ввод пользователем исходных данных: значение опорной частоты  $f_{\text{ГОЧ}}$ ; значение частоты сравнения в ЧФД  $f_{\text{ЧФД}}$ ; значение наименьшей выходной частоты  $f_{\text{вых min}}$ ; шаг перестройки выходной частоты  $\Delta f$ ; количество частотных точек  $n_{\text{ЧТ}}$ . Также указываются параметры ЦАП (разрядность аккумулятора фазы, число уровней квантования, величина усечения кода фазы).

Второй этап. Определение всех возможных комбинаций параметров синтезатора для формирования заданных выходных частот. На этом этапе алгоритма используется выражение (1), по которому заполняется трёхмерный массив  $Par$ , содержащий комбинации параметров синтезатора для формирования каждой частотной точки. В качестве параметров синтезатора выступают:

- коэффициент деления ДЧ  $N$ ;
- коэффициент умножения УЧ  $n_1$ ;
- коэффициент передачи ЦАП по основной частоте  $K_{ЦАП}$ ;
- номер образа основной частоты  $n$ ;
- код режима работы  $m$  (режим NRZ  $m = 1$ ; режим RZ  $m = 2$ ; режим RF  $m = 3$ ).

Третий этап. Определение амплитуды ДПСС выходного сигнала ЦАП. На данном этапе по моделям (2)–(4) моделируется выходной сигнал ЦАП в специальных режимах для каждой комбинации параметров массива  $Par$ . Для получения спектра во второй и третьей зонах Найквиста на данном этапе происходит процесс передискретизации во временной области. Далее с помощью быстрого преобразования Фурье заполняется трёхмерный массив  $S_{DAC\_db}$ , содержащий амплитуды компонентов спектра выходного сигнала.

Четвёртый этап. Определение оптимальных параметров синтезатора. На данном этапе из массива  $S_{DAC\_db}$  исключаются элементы, содержащие амплитуды образов основной частоты. Затем происходит определение амплитуд максимальных ДПСС, находящихся на отстройках от образов, не превышающих значение полосы пропускания петлевого ФНЧ (т.е. тех ДПСС, которые могут проникнуть в спектр выходного сигнала гибридного синтезатора). Значениями максимальных амплитуд для каждой частотной точки заполняется массив

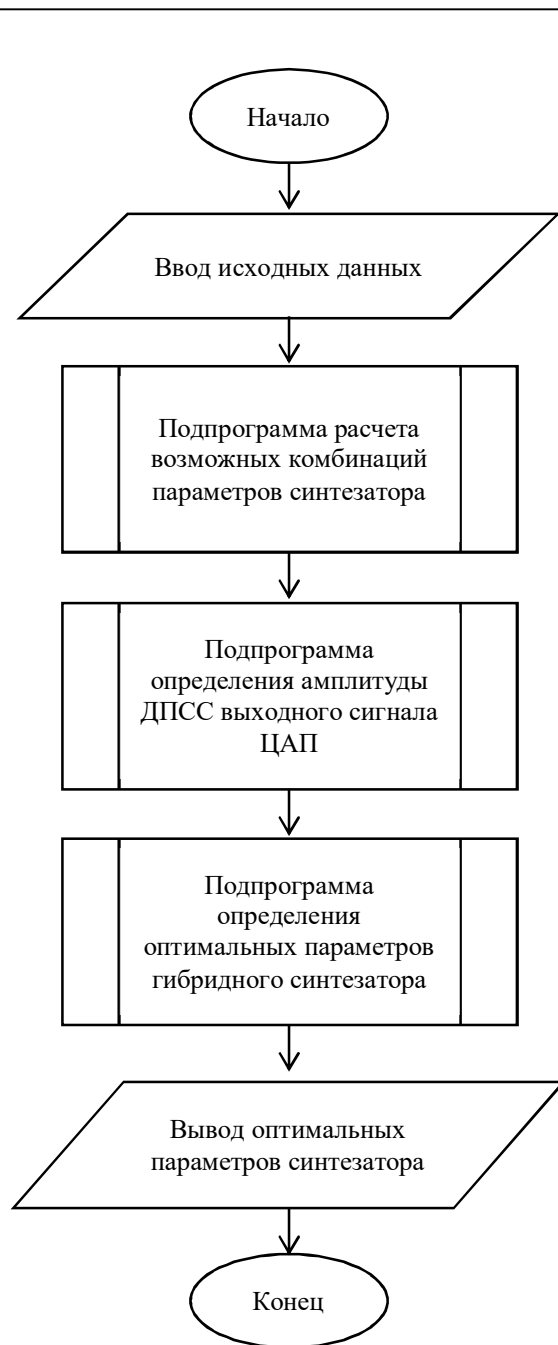


Рис. 5. Блок-схема предлагаемого алгоритма

$S_{DAC\_max}$ , из которого в дальнейшем выбирается наименьшее значение. В двумерный массив  $Par_{opt}$  сохраняются наборы параметров синтезатора, соответствующие наименьшим значениям нежелательных ДПСС, потенциально способных проникнуть в выходной сигнал синтезатора.



Пятый этап. Вывод оптимальных параметров синтезатора для каждой частотной точки.

Конец алгоритма.

Представленный алгоритм был реализован в виде программы на языке matlab. Рассмотрим пример оптимизации спектральных характеристик гибридного синтезатора. Исходные данные для моделирования:  $f_{Гоч} = f_{чФД} = 100$  МГц,  $f_{вых\ min} = 2700$  МГц,  $\Delta f = 18$  МГц,  $n_{чГ} = 12$ .

В результате работы алгоритма были получены комбинации параметров синтезатора, необходимых для формирования 12-ти частотных точек. В качестве примера в таблицу 1 и таблицу 2 сведены комбинации параметров для формирования первой ( $f_{вых\ 1} = 2700$  МГц) и последней ( $f_{вых\ 12} = 2898$  МГц) частотных точек соответственно.

Далее алгоритм для каждой комбинации параметров по математическим моделям (2)–(4) рассчитал сигналы во временной области. Затем с помощью быстрого преобразования Фурье были получены амплитудные значения ДПСС в спектре выходных сигналов в диапазоне частот, охватывающем первые три зоны Найквиста.

На следующем шаге алгоритм удаляет из массива, содержащего распределение амплитуд ДПСС в спектрах выходных сигналов, значения амплитуд образов основной частоты, сравнивает оставшиеся значения по амплитуде и выбирает параметры синтезатора, при которых достигается наименьшее количество и наименьший уровень ДПСС с частотами отстройки от необходимого образа, не превышающими значение частоты сравнения в ЧФД, т.е. потенциально способными проникнуть в спектр выходного сигнала системы ФАПЧ. Получившиеся в результате работы алгоритма комбинации оптимальных параметров синтезатора для формирования каждой частотной точки сведены в таблицу 3. Время работы программы длилось около одной минуты.

Реализация умножителя частоты на основе дополнительной системы ФАПЧ позволяет существенно расширить допустимые значения коэффициента умножения. Возможные схе-

Таблица 1. Комбинации параметров для формирования первой частотной точки  $f_{вых\ 1} = 2700$  МГц

№	$n_1$	$N$	$n$	$K_{ЦАП}$
1	15	9	1	0,2000
2	16	6	1	0,3125
3	16	7	1	0,2500
4	16	8	1	0,1875
5	20	1	1	0,3000
6	20	2	1	0,2500
7	20	3	1	0,2000
8	20	4	1	0,1500
9	20	10	-1	0,1500
10	24	9	-1	0,2500
11	25	6	-1	0,1600
12	25	7	-1	0,2000
13	25	8	-1	0,2400
14	25	9	-1	0,2800
15	25	10	-1	0,3200
16	28	6	-1	0,2500
17	30	3	-1	0,2000
18	30	6	-1	0,3000
19	32	1	-1	0,1875
20	32	2	-1	0,2188
21	32	3	-1	0,2500
22	32	4	-1	0,2812
23	32	5	-1	0,3125
24	32	6	-1	0,3438

Таблица 2. Комбинации параметров для формирования 12-той частотной точки  $f_{вых\ 12} = 2898$  МГц

№	$n_1$	$N$	$n$	$K_{ЦАП}$
1	15	9	1	0,3320
2	16	8	1	0,3113
3	16	9	1	0,2487
4	16	10	1	0,1862
5	20	2	1	0,3490
6	20	3	1	0,2990
7	20	4	1	0,2490
8	20	5	1	0,1990
9	24	9	-1	0,1675
10	25	8	-1	0,1608
11	25	9	-1	0,2008
12	25	10	-1	0,2408
13	26	10	-1	0,2700
14	27	9	-1	0,2600
15	28	7	-1	0,2150
16	30	6	-1	0,2340
17	30	9	-1	0,3340

технические ограничения на реализацию банка полосовых фильтров можно обойти, ограничив в алгоритме диапазон допустимых значений коэффициента деления в цепи обратной связи.

**Таблица 3.** Комбинации оптимальных параметров гибридного синтезатора для формирования заданных частотных точек

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$f_{\text{вых}}$ , МГц	2700	2718	2736	2754	2772	2790	2808	2826	2844	2862	2880	2898
$n_1$	32	30	14	15	20	14	25	25	20	15	25	20
$N$	2	6	10	9	3	9	8	10	4	9	9	2
$n$	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1
$K_{\text{ЦАП}}$	0,2188	0,294	0,24	0,236	0,236	0,35	0,1968	0,2696	0,222	0,308	0,208	0,349

### Заключение

В статье представлен алгоритм выбора оптимальных частотных соотношений в структуре синтезатора частот на основе быстродействующего цифро-аналогового преобразователя. Критерием оптимальности является минимизация ДПСС, проникающих в спектр выходного сигнала синтезатора. В алгоритме используются предложенные авторами математические модели выходного сигнала быстродействующего ЦАП в специальных режимах NRZ, RZ, RF, учитывающие нестабильности из-за дискретизации выходного сигнала, усечения кода фазы, ошибок квантования из-за конечной разрядности ЦАП.

Предложенный алгоритм, содержащий пять этапов, реализован в программе на языке matlab. В приведённом примере для формирования одной частотной точки рассчитывается в среднем около 20 различных комбинаций параметров синтезатора. В результате работы алгоритма выбирается одна комбинация, обеспечивающая наименьшую вероятность проникновения дискретных побочных спектральных составляющих в выходной сигнал.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК-358.2022.4.*

Поступила 01 июля 2023 г.

### Литература

1. Ямпурин Н.П., Болоньев В.В., Сафонова Е.В., Жалнев Е.Б. Формирование прецезионных частот и сигналов: учебное пособие. Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т., 2003. 187 с.
2. Белов Л.А. Формирование стабильных частот и сигналов. М.; Академия, 2005. 224 с.
3. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.
4. Pozar D.M. Microwave and RF Design of Wireless Systems. NY: Wiley, 2001. 384 p.
5. Kroupa V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. New York: John Wiley&Sons, Ltd, 1998. 396 p.
6. Левин В.А., Малиновский В.П., Романов С.К. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки. М.: Радио и связь, 1989. 232 с.
7. Пат. РФ № RU 172814 U1. Гибридный синтезатор частот с улучшенными спектральными характеристиками / Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Якименко К.А. Заявл. 24.04.2017; опубл. 25.07.2017.
8. Пат. РФ № RU 214526. Гибридный синтезатор частот на основе быстродействующего цифро-аналогового преобразователя в специальных режимах работы / Ромашов В.В., Якименко К.А., Докторов А.Н., Сошнева Н.А. Заявл. 25.05.2022; опубл. 02.11.2022.
9. Ромашов В.В., Якименко К.А., Докторов А.Н., Сошнева Н.А. Гибридный синтезатор частот на основе быстродействующего цифро-аналогового преобразователя // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. №4. С. 51–59.
10. Yakimenko K.A., Romashov V.V., Doktorov A.N., Sochneva N.A. Mathematical modelling and research of output spectrum of synthesizers based on high-speed DAC for 5G // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2573. No. 012042.

English

**OPTIMIZATION OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF HYBRID FREQUENCY SYNTHESIZERS BASED ON HIGH-SPEED DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTERS**

**Kirill Aleksandrovich Yakimenko** — PhD, Associate Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute<sup>1</sup> (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: [yakimenko.kirill@yandex.ru](mailto:yakimenko.kirill@yandex.ru)

**Vladimir Viktorovich Romashov** — Grand Dr. in Engineering, Professor, the Head of Radio Engineering Department, Murom Institute<sup>1</sup> (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: [yakimenko.kirill@yandex.ru](mailto:yakimenko.kirill@yandex.ru)

**Andrey Nikolaevich Doktorov** — PhD, Associate Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute<sup>1</sup> (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: [yakimenko.kirill@yandex.ru](mailto:yakimenko.kirill@yandex.ru)

Address: 602264, Russian Federation, Vladimir Region, Murom, Orlovskaya street. 23.

*Abstract:* Signal generators of modern telecommunication systems must provide high frequency resolution, good spectral and noise characteristics. A feature of frequency synthesizers based on high-speed digital-to-analog converters (DACs) is that the phase-locked frequency (PLL) system included in the device, due to its own filtering properties, reduces the number and level of discrete side spectral components (spurs) penetrating the synthesizer output, generated at the DAC output due to phase code truncation, non-multiplicity and quantization errors, etc. However, in some cases, the spurs still penetrate the bandwidth of the low-pass loop filter. This article proposes an algorithm that allows you to determine the optimal frequency ratios in the structure of synthesizers based on a high-speed DAC when generating signals in the frequency range. The algorithm uses mathematical models of the output signals of a high-speed DAC in special operating modes. As a result of the proposed algorithm, from all possible combinations of transmission coefficients of composite synthesizer blocks, those are selected at which the probability of penetration of the spurs into the spectrum of the output signal of the frequency synthesizer is minimized.

*Keywords:* high-speed digital-to-analog converter, DAC, direct digital synthesis, discrete side components of the spectrum, algorithm.

### References

1. *Yampurin N.P., Boloznev V.V., Safonova E.V., Zhalnev E.B.* Generating of precision frequencies and signals: textbook; Nizhny Novgorod State Technical University. Nizhny Novgorod, 2003. 187 p.
2. *Belov L.A.* Generating of stable frequencies and signals. Moscow; Academiya, 2005. 224 p.
3. *Ryzhkov A.V., Popov V.N.* Frequency synthesizers in radio communication technology. Moscow: Radio i svaz', 1991. 264 p.
4. *Pozar D.M.* Microwave and RF Design of Wireless Systems. NY: Wiley, 2001. 384 p.
5. *Kroupa V.F.* Direct Digital Frequency Synthesizers. New York: John Wiley&Sons, Ltd, 1998. 396 p.
6. *Levin V.A., Malinovsky V.P., Romanov S.K.* Frequency synthesizers with a pulse-phase auto-tuning system. Moscow: Radio i svaz', 1989. 232 p.
7. Pat. RF No. RU 172814 U1. Hybrid frequency synthesizer with improved spectral characteristics. *Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A.* Appl. 24.04.2017; publ. 25.07.2017.
8. Pat. RF No. RU 214526. Hybrid frequency synthesizer based on a high-speed digital-to-analog converter in special operating modes. *Romashov V.V., Yakimenko K.A., Doctors A.N., Sochneva N.A.* Appl. 05.25.2022; publ. 02.11.2022.
9. *Romashov V.V., Yakimenko K.A., Doktorov A.N., Sochneva N.A.* Hybrid frequency synthesizer based on a high-speed digital-analog converter. Radioengineering and telecommunication systems. 2022. No. 4. Pp. 51–59.
10. *Yakimenko K.A., Romashov V.V., Doktorov A.N., Sochneva N.A.* Mathematical modelling and research of output spectrum of synthesizers based on high-speed DAC for 5G. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2573, No. 012042.