

УДК 621.396.967

Н.П. Кандырин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ШУМОВ КОМБИНИРОВАННЫХ СИНТЕЗАТОРОВ СИГНАЛОВ

*Рассматриваются вопросы проектирования комбинированных синтезаторов сигналов на основе систем ФАПЧ и цифровых синтезаторов сигналов. Проведен анализ фазовых шумов таких синтезаторов от частоты расстройки.*

**Ключевые слова:** комбинированный синтезатор сигналов, фазовая автоподстройка частоты, фазовый шум.

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ публикаций.

При проектировании устройств формирования сигналов одним из основных вопросов, требующих детальной проработки, является вопрос частотного планирования формирователя. К тому же к формирователям сигналов таких систем предъявляются высокие требования в отношении стабильности и спектрального состава колебаний, уровня фазового шума и длительности переходных процессов.

С развитием современной цифровой элементной базы при формировании сигналов все большее применение находят интегральные цифровые синтезаторы сигналов (ЦСС), основанные на методе прямого цифрового синтеза [1] и обладающие рядом существенных преимуществ перед системами на основе ФАПЧ и широкими функциональными возможностями [2, 3]. Однако, использование ЦСС для формирования сигналов непосредственно в СВЧ и УВЧ диапазонах ограничено максимальным значением основной частоты синтезируемого выходного сигнала, которое в настоящее время не превышает 1,5 ГГц.

Таким образом, во первых, для повышения выходной частоты таких синтезаторов в интегральных ЦСС используют умножители тактовой частоты, реализованные в виде транзисторного умножителя или на основе системы ФАПЧ с делителем с переменным коэффициентом деления в цепи обратной связи, изменяемым в широких пределах. Это позволяет использовать в качестве опорного сигнала высококачественные низкочастотные кварцевые генераторы.

Однако при этом неизвестной является величина фазовых шумов при различных коэффициентах умножения тактовой частоты.

Во вторых – для повышения выходной частоты ЦСС в область СВЧ, также используют умножение с помощью транзисторных умножителей или систем ФАПЧ.

Для теоретического анализа шумовых характеристик радиоустройств используют аппроксимацию спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов степенными функциями [4].

Их применение существенно упрощает проектирование синтезаторов частот, формирователей

сигналов и других устройств, позволяя сравнивать различные варианты реализации по уровню СПМ фазовых шумов. Для ЦСС имеются модели СПМ фазовых шумов [5, 6], которые позволяют без экспериментальных исследований определять шумовые характеристики ЦСС для различных значений выходной и тактовой частот, а также исследовать шумовые характеристики устройств на основе ЦСС.

**Целью статьи** является исследование шумовых свойств различных вариантов комбинированных формирователей сигналов на основе цифровых синтезаторов сигналов.

## Основной материал

### 1. Шумовые характеристики ЦСС со встроенным множителем тактовой частоты на ФАПЧ

Для формирования высокой тактовой частоты в ЦСС используются встроенные множители тактовой частоты на петле ИФАПЧ. При этом величина фазовых шумов при различных коэффициентах умножения остается неизвестной.

Разработчики микросхем, как правило, прилагают полученные экспериментально зависимости уровней шумов лишь для некоторых (одного или двух) коэффициентов умножения. Делать такие измерения довольно сложно из-за большой стоимости высокоточных анализаторов спектра, поэтому предлагается рассчитывать фазовые шумы для других коэффициентов математическими методами.

Рассмотрим соотношения для однопетлевой системы ИФАПЧ, применяемой в качестве множителя тактовой частоты (например, в синтезаторе AD9911) с коэффициентом умножения от 4 до 20. Обобщенная структурная схема такого ЦСС приведена на рис. 1.

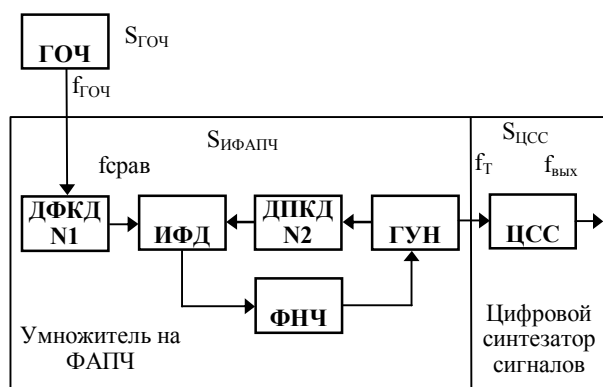


Рис. 1. Структурная схема интегрального ЦСС

Входной сигнал – это последовательность импульсов с частотой  $f_{ГОЧ}$ , подаваемая с генератора опорной частоты на делитель частоты с фиксированным коэффициентом деления, равным  $N1$ . Частота  $f_{ГОЧ}$  поделенная на коэффициент деления  $N1$  является первой частотой сравнения для фазового

детектора. Второй частотой сравнения является частота после деления выходной частоты генератора ГУН на соответствующий коэффициент деления ДПКД  $N2$ . Полученный сигнал на выходе фазового детектора с информацией рассогласования через ФНЧ преобразуется в напряжение, управляющее частотой ГУН. Его выходная частота подается на выход ФАПЧ, а также на ДПКД  $N2$ , где делится на коэффициент  $N2$ . Петля ФАПЧ замыкается, обеспечивая подстройку ГУН под частоту ГОЧ. Коэффициент умножения ИФАПЧ равен  $K = N2/N1$ . Его можно изменять двумя способами. Первый способ – изменение коэффициента  $N1$ , вызывающее изменение кратности деления частоты ГОЧ, и, следовательно, частоты сравнения ИФД. Второй способ – изменение коэффициента  $N2$ , изменяющее кратность деления частоты ГУН, и значение частоты сравнения.

Для оценки шумовых свойств в диапазоне отстроек воспользуемся соотношением для относительной спектральной плотности фазовых флюктуаций выходного сигнала ЦСС, которое можно записать в виде

$$S_{\text{вых}}(F) = K_{\text{ЦСС}}^2 S_{\text{ФАПЧ}}(F) + S_{\text{ЦСС}}(F), \quad (1)$$

где  $S_{\text{ФАПЧ}}(F)$  – спектральная плотность фазовых шумов сигнала на выходе системы ИФАПЧ;  $S_{\text{ЦСС}}(F)$  –

собственные шумы ЦСС;  $K_{\text{ЦСС}}^2 = \left(\frac{f_{\text{вых}}}{f_T}\right)^2$  – коэффициент передачи входного шума ЦСС;  $f_{\text{вых}}$  – частота выходного сигнала ЦСС;  $f_T$  – тактовая частота.

Для СПМ фазовых шумов выходного сигнала системы ФАПЧ воспользуемся выражениями, полученными в [4–6] и ФАПЧ [6, 7]

$$S_{\text{ЦСС}}(F) = \left(\frac{f_{\text{вых}}}{f_T}\right)^2 \cdot \left(\frac{10^{k_2}}{F^2} + \frac{10^{k_1}}{F} + 10^{k_4}\right) + 10^{k_3} + 2^{-2N-0,59} \left(\frac{f_{\text{вых}}}{f_T^2}\right); \quad (2)$$

$$S_{\text{ФАПЧ}}(F) = \left[ \frac{S_{\text{ГОЧ}}(F)}{N1^2} + (S_{\text{ДФКД}}(F) + S_{\text{ДПКД}}(F) + \frac{S_{\text{ИФД}}(F)}{E_{\text{ИФД}}^2}) \right] \cdot N2^2 \cdot |H_{31}(F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) \cdot |H_{32}(F)|^2, \quad (3)$$

где  $S_{\text{ГОЧ}}(F)$ ,  $S_{\text{ДФКД}}(F)$ ,  $S_{\text{ДПКД}}(F)$ ,  $S_{\text{ИФД}}(F)$ ,  $S_{\text{ГУН}}(F)$  – СПМ фазовых шумов генератора опорной частоты ГОЧ, делителей частоты ДФКД и ДПКД, импульсно-фазового детектора ИФД, генератора управляемого напряжением ГУН [4, 7].

В качестве примера будем рассматривать ЦСС типа AD9911, для которого количество разрядов ЦАП  $N = 10$ , а коэффициенты аппроксимации  $k_i$

СПМ фазових шумов согласно [8] соответственно равны  $k_1 = -9.0, k_2 = -8.3, k_3 = -17.8, k_4 = -14.8$ .

С помощью программы MathCAD для ЦСС AD9911 по формулам (1) – (3) проведено моделирование СПМ фазовых шумов со встроенным множителем тактовой частоты на основе кольца ФАПЧ с коэффициентом умножения 5...20. Результаты моделирования и сравнение с экспериментом приведены на рис. 2.

Из рис. 2 видно что, при отстройке от 10 Гц до 30 кГц остаточный фазовый шум обусловлен фликкер-шумом интегрального ЦСС, от 30 кГц до 10 МГц – шумом квантования ЦСС. На рис. 2, б; 2, в резкое увеличение шума характеризует подключение умножителя на ИФАПЧ, а величина выброса при отстройке около 1 МГц напрямую зависит от таких параметров ФАПЧ, как запас по усилению,

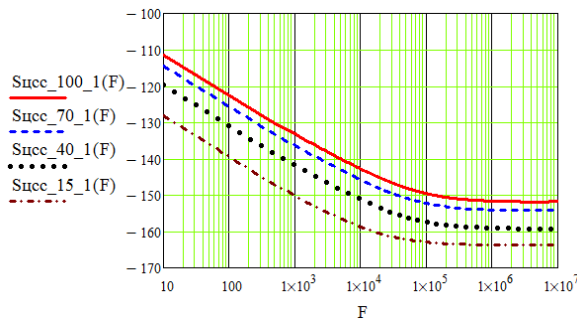
показатель колебательности, а также постоянной времени фильтра нижних частот.

Применение тактового умножителя на ИФАПЧ позволяет использовать ГОЧ в виде кварцевых генераторов, работающих на частотах в единицы и несколько десятков мегагерц. Однако значение максимальной тактовой частоты для данного ЦСС составит 500 МГц.

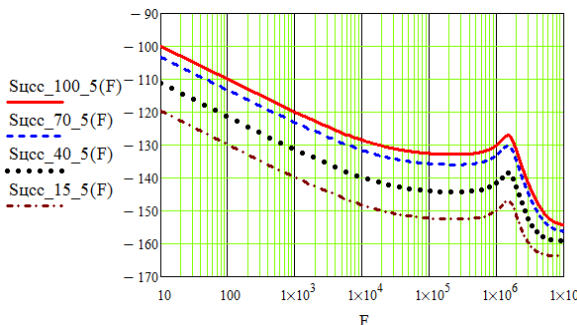
## 2. Шумовые характеристики ЦСС с транзисторным умножителем тактовой частоты

Для сравнения с предыдущим примером рассмотрим вариант умножения тактовой частоты на дискретных элементах, а именно на биполярных или полевых транзисторах.

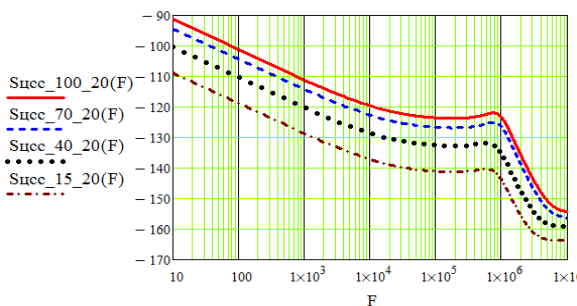
Обобщенная структурная схема такого формирователя приведена на рис. 3.



а



б



в

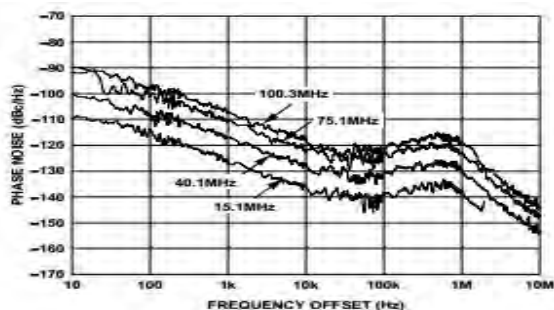
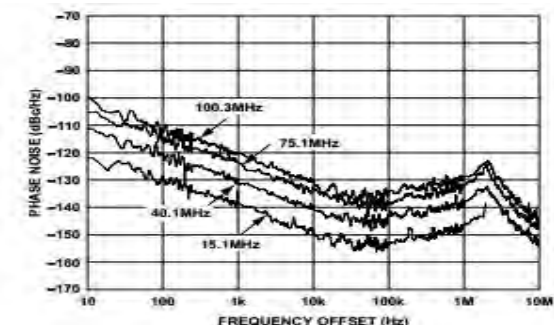
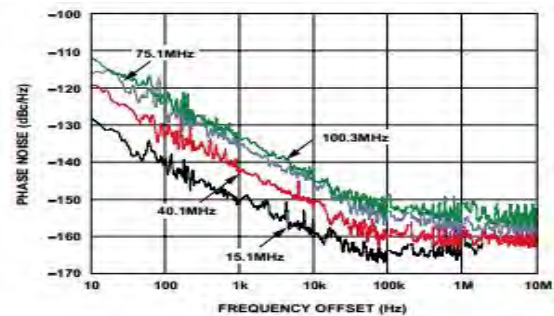


Рис. 2. Теоретические и экспериментальные СПМ фазовых шумов AD9911 для выходных частот 15, 40, 75 и 100 МГц при:  
а – отключенном умножителе и тактовой частоте 500 МГц;

б – остаточный фазовый шум при включенном умножителе на  $\times 5$  и тактовой частоте 500 МГц;  
в – остаточный фазовый шум при включенном умножителе на  $\times 20$  и тактовой частоте 500 МГц

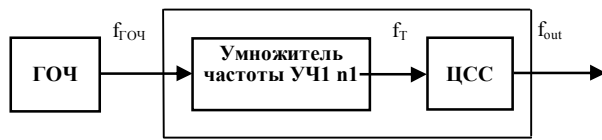


Рис. 3. Обобщенная структурная схема ЦСС с транзисторным умножителем тактовой частоты

На основании этой схемы составлена математическая модель шумовых характеристик такого формирователя сигналов

$$S_{\Phi 1}(F) = \left( (S_{\text{Гоч}}(F) \cdot n_1^2 + S_{\text{УЧ1}}(F)) \cdot K_{\text{ЦСС}}^2 + S_{\text{ЦСС}}(F) \right). \quad (4)$$

Здесь  $S_{\text{УЧ1}}(F)$  – СПМ фазовых шумов умножителя частоты УЧ1. В качестве генератора опорной частоты применен кварцевый генератор.

Используя формулу (4) для различных коэффициентов умножения  $n_1$  рассчитаем СПМ фазовых шумов для ЦСС AD9911.

Результаты моделирования приведены на рис. 4.

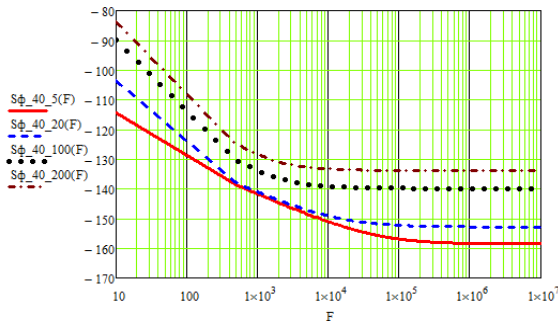


Рис. 4. СПМ фазовых шумов с умножением тактовой частоты транзисторным умножителем на 5, 20, 100, 200. Тактовая частота равна 500 МГц. Выходная частота формирования 40 МГц

Из полученных на рис. 2 и рис. 4 графиков следует что, при одной и той же выходной частоте формирователя и одинаковом коэффициенте умножения СПМ фазовых шумов на 3...5 дБ меньше в формирователе с транзисторным умножителем тактовой частоты. Прежде всего, это объясняется тем, что основной вклад шумов в системе ФАПЧ вносит импульсно фазовый детектор.

### 3. Комбинированные синтезаторы на ЦСС и дискретных умножителях тактовой и выходной частот

Для последующего умножения выходной частоты формирования возможно применение умножителей на транзисторах или с помощью системы ФАПЧ. Рассмотрим случай умножения тактовой частоты транзисторным умножителем  $n_1$  на пять, а умножение выходной частоты  $n_2$  с помощью транзисторного умножителя на 5, 20, 100 и 200. Структурная схема одного из вариантов формирователя приведена на рис. 5.

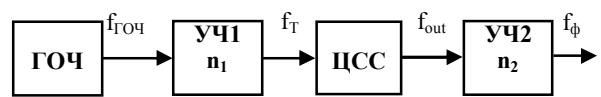


Рис. 5. Обобщенная структурная схема формирователя сигналов с транзисторным умножителем тактовой и выходной частот

Математическая модель шумовых характеристик такого формирователя описывается выражением

$$S_{\Phi 2}(F) = \left( (S_{\text{Гоч}}(F) \cdot n_1^2 + S_{\text{УЧ1}}(F)) K_{\text{ЦСС}}^2 + S_{\text{ЦСС}}(F) \right) \times (n_2^2 + S_{\text{УЧ2}}(F)). \quad (5)$$

Здесь  $S_{\text{УЧ2}}(F)$  – СПМ фазовых шумов умножителя частоты УЧ2.

Используя формулу (5) для коэффициента умножения  $n_1=5$  и различных коэффициентов  $n_2$  равных 5, 20, 100 и 200 рассчитаем СПМ фазовых шумов для ЦСС AD9911. Рассчитанные СПМ умножителей частоты на биполярных и полевых транзисторах показали, что собственные шумы умножителей невелики и их вклад в шум выходного сигнала незначителен даже с учетом их умножения в последующих каскадах. На рис. 6 приведены спектральные характеристики выходного сигнала исследуемого синтезатора с умножителями на транзисторах.

Как видно из рис. 6, значительный вклад в увеличение (на 7 дБ/Гц) СПМ шума выходного сигнала синтезатора вносят умножители частоты в 20 раз и более 25 дБ/Гц при умножении частоты в 200 раз.

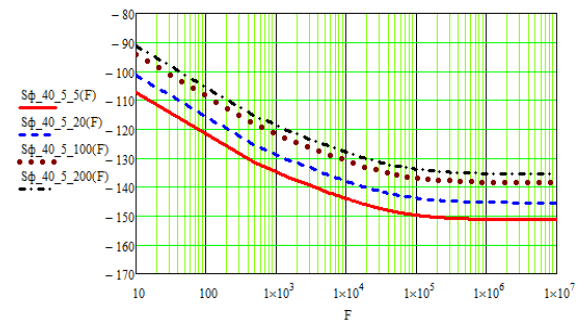


Рис. 6. Спектральные характеристики комбинированного синтезатора сигналов с транзисторными умножителями частоты. Тактовая частота равна 500 МГц. Выходная частота формирования 40 МГц

### 4. Комбинированные синтезаторы на ЦСС с ФАПЧ и транзисторном умножителе выходной частоты

Для сравнительного анализа СПМ фазовых шумов, рассмотрим еще один вариант построения формирователей сигналов, где в качестве умножителя тактовой частоты используется система ФАПЧ, а в качестве умножителя выходной частоты транзисторный умножитель. Структурная схема такого формирователя приведена на рис. 7.

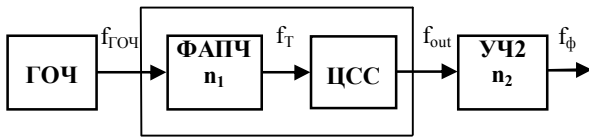


Рис. 7. Обобщенная структурная схема формирователя сигналов с умножителем тактовой частоты на ФАПЧ и транзисторном умножителе выходной частоты

Математическая модель СПМ фазового шума такого рода формирователя описывается следующим выражением

$$S_{\Phi_3}(F) = (K_{\text{ЦСС}}^2 S_{\text{ИФАПЧ}}(F) + S_{\text{ЦСС}}(F)) n_2^2 + S_{\text{УЧ2}}(F);$$

$$S_{\text{ИФАПЧ}}(F) = \left[ S_{\text{ГОЧ}}(F) + (S_{\text{ДПКД}}(F) + S_{\text{ИФД}}(F) + S_{\text{ФНЧ}}(F)) \right] \times N_2^2 |H_{31}(F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) |H_{32}(F)|^2. \quad (6)$$

Используя формулу (6) рассчитаем СПМ фазовых шумов этой схемы при фиксированном коэффициенте умножения тактовой частоты системой ФАПЧ равной пяти ( $N_2=5$ ) для различных коэффициентов умножения транзисторным умножителем ( $n_2=5, 20, 100, 200$ ). Результаты моделирования приведены на рис. 8. Анализируя результаты моделирования приведенных на рис. 6 и рис. 8 приходим к выводу, что при одинаковых коэффициентах умножения транзисторных умножителей выходной частоты фазовый шум больше там, где тактовая частота умножается с помощью системы ФАПЧ.

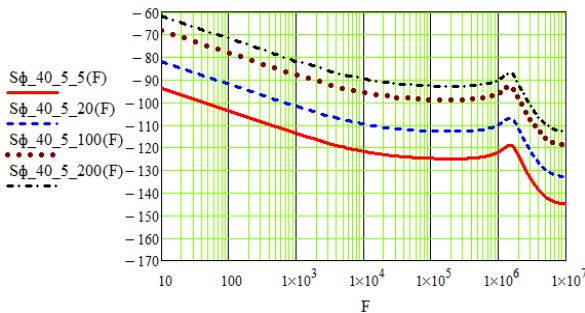


Рис. 8. Шумовые характеристики комбинированного синтезатора сигналов с умножением тактовой частоты системой ФАПЧ и умножением выходной частоты транзисторным умножителем.

Тактовая частота равна 500 МГц.  
Выходная частота формирования 40 МГц

### 5. Комбинированные синтезаторы на ЦСС с транзисторным умножителем тактовой частоты и умножителем выходной частоты на ФАПЧ

На рис. 9 представлена схема комбинированного синтезатора сигналов, где ЦСС с умножителем тактовой частоты на дискретных элементах используется в качестве генератора опорного сигнала для системы

ФАПЧ. Поскольку шаг перестройки ЦСС по частоте можно сделать очень малым, то результирующий шаг, даже после умножения в системе ФАПЧ будет оставаться небольшим. Благодаря комбинации системы ФАПЧ и ЦСС можно покрывать большой частотный диапазон, в то время как выходная частота ЦСС будет меняться в небольших пределах.

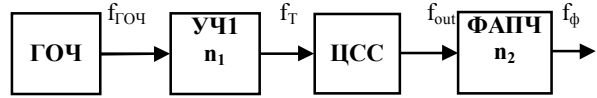


Рис. 9. Комбинированный синтезатор сигналов с умножением тактовой частоты на транзисторном умножителе и выходной частоты на ФАПЧ

Для расчета фазовых шумов комбинированного синтезатора сигналов по рис. 9 использовалась модель СПМ фазовых флуктуаций выходного сигнала ЦСС с учетом шумов умножителя тактовой частоты на транзисторах вида

$$S_{\Phi}(F) = ((S_{\text{ГОЧ}}(F) \cdot n_1^2 + S_{\text{УЧ1}}(F)) K_{\text{ЦСС}}^2 + S_{\text{ЦСС}}(F)).$$

Тогда СПМ фазовых шумов всего комбинированного синтезатора имеет вид

$$S_{\Phi_4}(F) = [S_{\Phi}(F) + S_{\Phi_Д}(F)] \cdot N_2^2 |H_{31}(F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) \cdot |H_{32}(F)|^2. \quad (7)$$

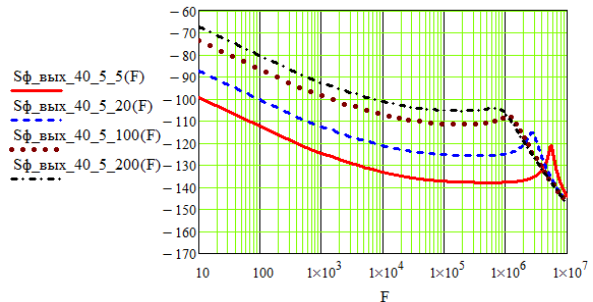


Рис. 10. Шумовые характеристики комбинированного синтезатора с использованием транзисторного умножителя тактовой частоты на 5 и умножением выходной частоты на 5, 20, 100 и 200 с помощью системы ФАПЧ

Анализируя зависимости рис. 8 и рис. 11, можно сделать вывод, что шум выходного сигнала в большей степени определяется шумами умножителя тактовой частоты. На рис.8 таковым является умножитель на ФАПЧ, шумы которого определяются в основном шумами фазового детектора.

### 6. Комбинированные синтезаторы на ЦСС со встроенным умножителем тактовой частоты и умножителем выходной частоты на ФАПЧ

Рассмотрим случай, когда умножитель выходной частоты после ЦСС выполнен с использованием системы ФАПЧ2, а умножитель тактовой частоты на ФАПЧ1 (рис. 11).

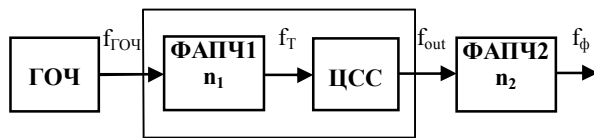


Рис. 11. Обобщенная структурная схема формирователя сигналов с умножением тактовой и выходной частот на ФАПЧ

Расчет фазовых шумов такого комбинированного синтезатора производился с использованием модели СПМ фазовых шумов ЦСС с умножением тактовой частоты системой ФАПЧ

$$S_{\Phi}(F) = S_{\text{ФАПЧ}}(F) K_{\text{ЦСС}}^2 + S_{\text{ЦСС}}(F),$$

с помощью выражения

$$S_{\Phi_s}(F) = [S_{\Phi}(F) + S_{\Phi_d}(F)] \cdot N_2^2 |H_{31}(F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) \cdot |H_{32}(F)|^2. \quad (8)$$

На рис. 12 приведены СПМ фазовых шумов такого синтезатора для различных частот сравнения систем ФАПЧ при одной и той же выходной частоте в 40 МГц и тактовой частоте 500 Гц.

Анализируя зависимости рис. 12, как и в предыдущих случаях, шумы выходного сигнала в основном определяются шумами умножителя тактовой частоты.

Кроме всего прочего, при равных условиях комбинированные синтезаторы сигналов на основе ЦСС с последующим умножением частоты на транзисторных умножителях либо на ФАПЧ имеют практически сравнимые характеристики.

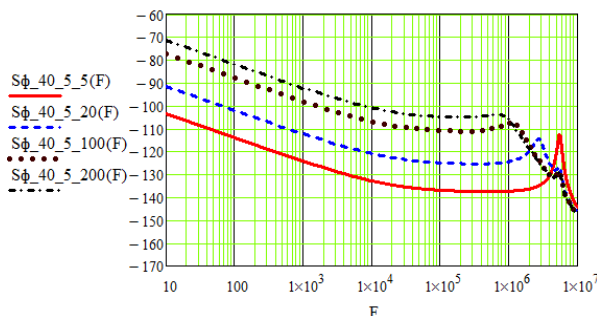


Рис. 12. Спектральные характеристики комбинированного синтезатора сигналов с умножением тактовой на 5 и выходной частот системой ФАПЧ на 5, 20, 100, 200

## Выводы

Разработаны и проанализированы математические модели СПМ фазовых шумов основных структурных схем комбинированных синтезаторов сигналов на основе ЦСС. Исследование шумовых характеристик такого типа синтезаторов показало хорошее совпадение расчетных данных СПМ фазовых шумов с экспериментальными зависимостями.

Из результатов полученных при анализе шумов комбинированных синтезаторов сигналов следует вывод, что уровень фазовых шумов комбинированных синтезаторов порой намного ниже, чем для синтезаторов на основе систем фазовой автоподстройки частоты при равных параметрах на выходе.

## Список литературы

1. Цифровые синтезаторы сигналов (DDS) и модуляторы. [Электрон. ресурс]: сайт фирмы Analog Devices, Inc., 2013. URL: <http://www.analog.com/ru/rfif-component/direkt-digital-synthesis-dds/products/index.html>.
2. Kroupa V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. – 1998. – John Wiley @ Sons, Ltd. – 396 с.
3. Ромашов В.В. Формирование сигналов в ОБЧ и УВЧ диапазонах при использовании методов прямого цифрового синтеза частот / В.В. Ромашов, К.К. Храмов // Радиотехника. – 2007. – № 6. – С. 39-41.
4. Kroupa V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis. 2003, John Wiley @ Sons, Ltd. 320 p.
5. Romashov V.V. Research of Phase Noise of Direct Digital Synthesizers / V.V. Romashov, L.V. Romashova, K.K. Khramov // Proc. of the 2011 IEEE Int. Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON – 2011, Krasnoyarsk, Russia, September 15-16, 2011. – P. 168-171.
6. Кандырин Н.П. Моделирование шумовых характеристик цифровых синтезаторов сигналов / Н.П. Кандырин // Системы обработки информации: сб. науч. пр. – Х.: XV ПС, 2014. – Вып. 4(120). – С. 7-10.
7. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи / А.В. Рыжков, В.Н. Попов. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с., ил.
8. Ромашов В.В. Методика расчета коэффициентов аппроксимации спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2012. – № 1. – С. 24-27.

Поступила в редколлегию 4.07.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## АНАЛІЗ ФАЗОВИХ ШУМІВ КОМБІНОВАНИХ СИНТЕЗАТОРІВ СИГНАЛІВ

М.П. Кандирін

Розглядаються питання проектування комбінованих формувачів сигналів на основі систем ФАПЧ і цифрових синтезаторів сигналів. Проведений аналіз фазових шумів таких синтезаторів від частоти розладу.

**Ключові слова:** комбінований синтезатор сигналів, фазове автопідстроювання частоти, фазовий шум.

## PHASED NOISE ANALYSIS OF INTEGRATED WAVEFORM SYNTHESIZERS

N.P. Kandyrin

Designing of integrated signal conditioners are examined on the basis of phase-lock system and digital waveform synthesizers. The phased noise analysis of such synthesizers from frequency mismatch is conducted.

**Keywords:** integrated waveform synthesizers phase lock, phased noise.