

Александр Каширин, ведущий инженер ФГУП «НПП «Гамма»

# Синтез частот на микросхемах ФАПЧ с улучшенными спектральными характеристиками. Часть 1

В статье рассматривается схемотехническое решение, позволяющее достичь низких уровней фазового шума и побочных спектральных составляющих в широком диапазоне частот на основе серийно выпускаемых микросхем ФАПЧ.

## Введение

Получение качественного спектра синтезируемого сигнала во многом определяется характеристиками ключевых электронных компонентов — опорным генератором (ОГ), микросхемами прямого цифрового синтеза, микросхемами косвенного синтеза с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ), управляемыми генераторами различного типа и другими активными и пассивными элементами. По ряду ключевых позиций отечественная продукция все еще уступает зарубежным аналогам. При этом зарубежные электронные компоненты, особенно с передовыми характеристиками, могут быть труднодоступны. Указанные сложности можно преодолеть на системном уровне за счет выбора подходящей архитектуры [1, 2]. В связи с этим следует отметить определенные успехи в создании малошумящих источников опорного сигнала СВЧ-диапазона [3, 4], что позволяет на их основе конструировать синтезаторы частот с низким уровнем фазового шума, не прибегая к использованию уникальных зарубежных компонентов. В статье представлен вариант структурной схемы синтеза частот с применением серийных микросхем ФАПЧ.

## Типовое включение микросхем ФАПЧ

Микросхемы, работающие на принципе косвенного синтеза с фазовой автоподстройкой частоты, находят широкое применение ввиду относительно простой реализации однокольцевых схем, низкого энергопотребления, наличия аналогов, невысокой стоимости. Наибольшее распространение получили два вида микросхем ФАПЧ. Первым требуется подключение внешнего генератора, управляемого напряжением (ГУН), вторые его содержат

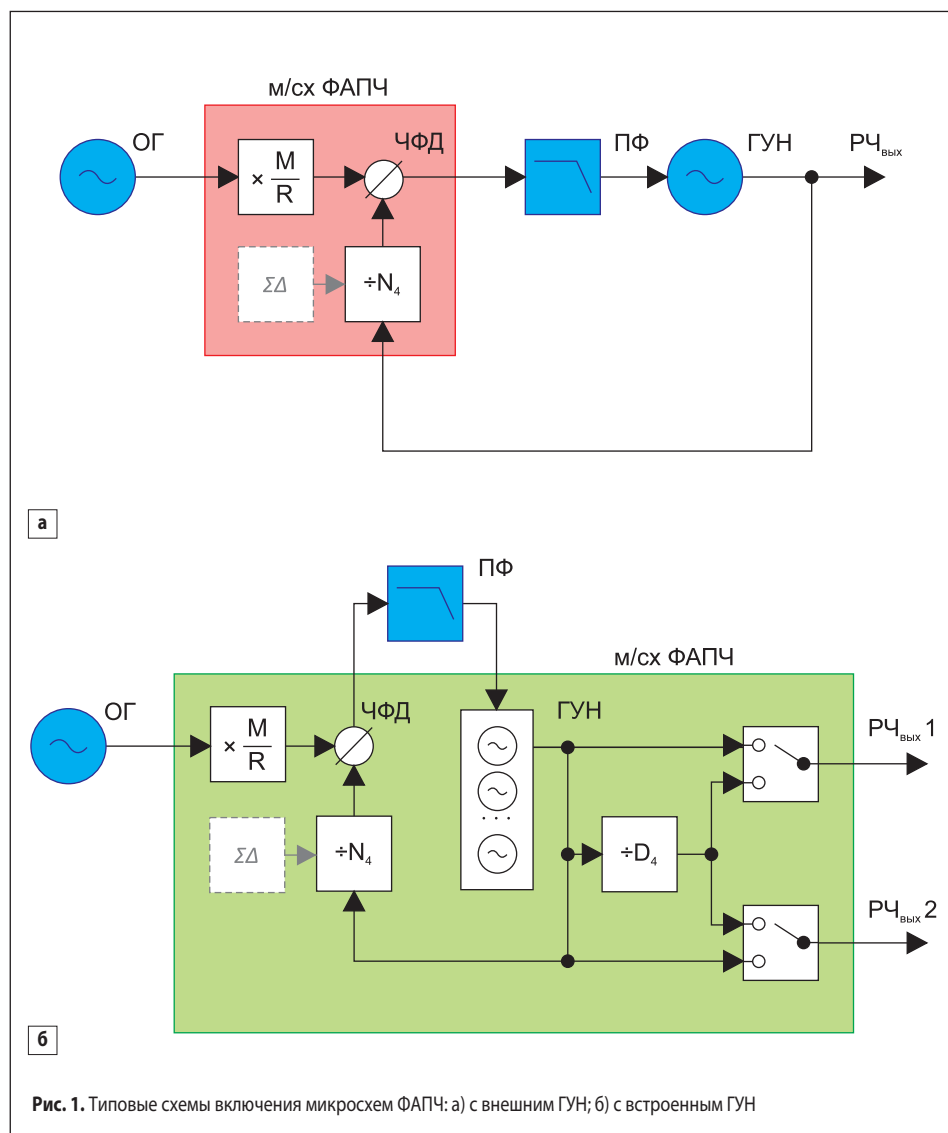


Рис. 1. Типовые схемы включения микросхем ФАПЧ: а) с внешним ГУН; б) с встроенным ГУН

жат в своем составе. Указанные разновидности микросхем, включенные в типовые схемы, приведены на рис. 1а и б соответственно.

На приведенных структурных схемах и далее по тексту приняты следующие обозначения: ОГ — опорный генератор; ЧФД — частотно-фазовый детектор; ПФ — петлевой фильтр; M, R, N, D — коэффициенты деления (умножения) частоты;  $\Sigma\Delta$  — сигма-дельта модулятор, реализующий дробное деление частоты; РЧ<sub>вых</sub> — выход синтезированного радиочастотного сигнала.

В состав микросхем ФАПЧ входит необходимый для построения однокольцевого синтезатора частот набор функциональных блоков: частотно-фазовый детектор (ЧФД), делители и умножители частоты, схемы питания и управления. Типовому включению микросхем ФАПЧ присущи такие недостатки, как высокий уровень вносимого фазового шума (рис. 2а) и высокий уровень побочных спектральных составляющих (ПСС), обнаруживающийся при работе в дробном режиме (рис. 2б).

Снижение уровня фазового шума и побочных спектральных составляющих достигается с помощью методов, изложенных в различных источниках литературы, посвященных синтезу частот [1, 5–8]. В схемах косвенного синтеза существенное снижение уровня вносимого фазового шума достигается введением понижающего преобразования частоты в цепь обратной связи. Качество выходного сигнала при этом определяется в большей степени высокочастотным источником опорного сигнала, часто именуемым подставкой. Снижение уровня побочных спектральных составляющих производится такими методами, как сочетание повышающего преобразования частоты с последующим делением или путем изменения

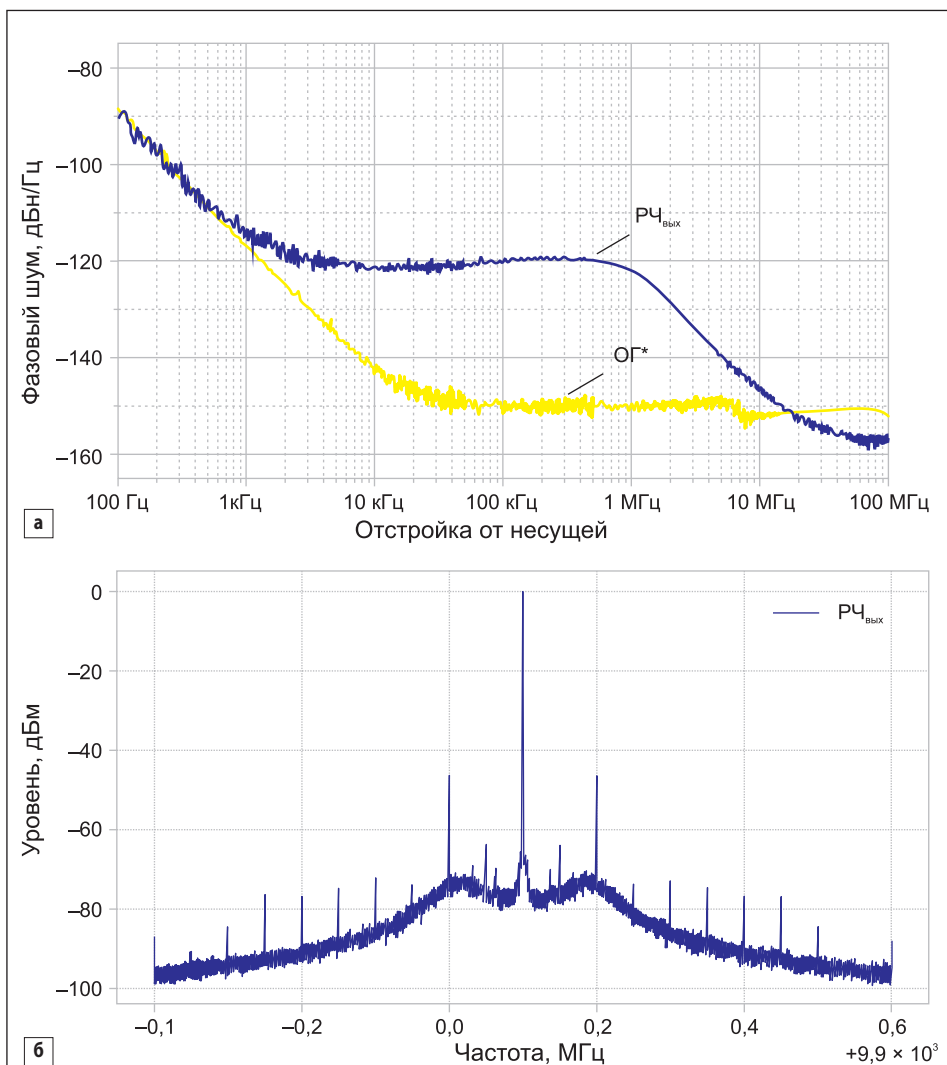


Рис. 2. Примеры спектральных характеристик типового включения микросхем ФАПЧ: а) фазовый шум сигнала на выходе микросхемы ФАПЧ (РЧ<sub>вых</sub>) и приведенный к частоте выходного сигнала микросхемы ФАПЧ фазовый шум опорного генератора (ОГ\*); б) побочные спектральные составляющие

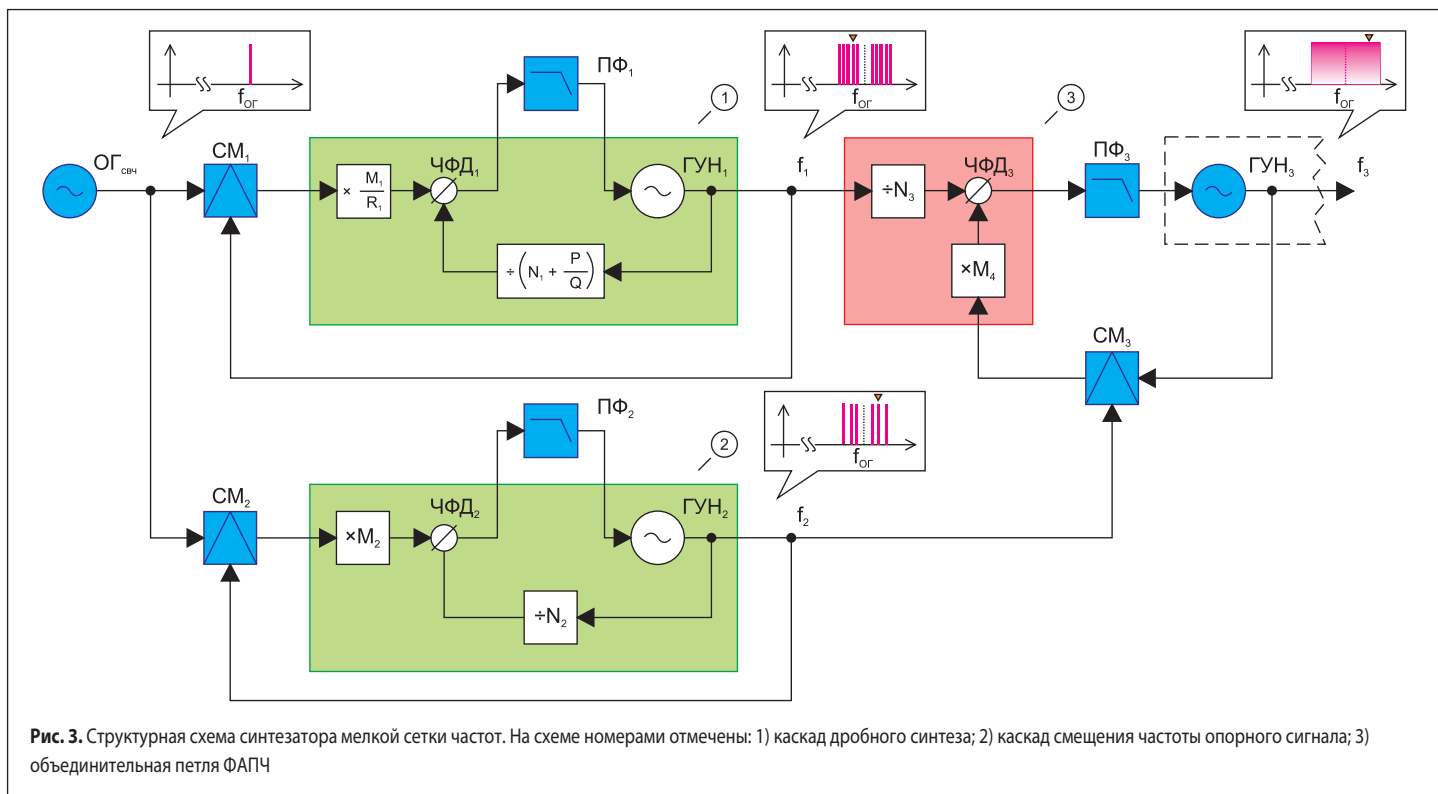


Рис. 3. Структурная схема синтезатора мелкой сетки частот. На схеме номерами отмечены: 1) каскад дробного синтеза; 2) каскад смещения частоты опорного сигнала; 3) объединительная петля ФАПЧ

частоты опорного сигнала, чтобы вывести частотную отстройку помехи за пределы полосы пропускания петлевого фильтра. Используя указанные методы применительно к стандартным микросхемам ФАПЧ, можно сконструировать синтезаторы частот, обладающие приемлемыми спектральными

характеристиками. Удачным примером такой конструкции является решение с автосмещением в обратной связи петли ФАПЧ [9]. На основе данного решения построены синтезаторы частот с низким уровнем фазового шума в компактном исполнении. В то же время полученный уровень побочных спек-

тральных составляющих довольно высок, что ограничивает применение данного решения в задачах с повышенными требованиями к спектральной чистоте выходного сигнала.

### Синтез мелкой сетки частот

В качестве примера улучшения спектральных характеристик можно привести структурную схему синтезатора мелкой сетки частот, изображенную на рис. 3.

На данной схеме введены дополнительные обозначения: СМ — смеситель; Р и Q — соответственно числитель и знаменатель дробной части коэффициента деления частоты;

Предполагается, что в качестве источника опорного сигнала выступает малошумящий высокочастотный генератор, работающий на фиксированной частоте. Схема состоит из трех каскадов, в каждом из которых содержится микросхема ФАПЧ, включенная со смесителем в цепи обратной связи. Такое включение эффективно снижает уровень фазового шума, как показано на рис. 4.

В первом каскаде формируется исходная мелкая сетка частот путем дробного деления частоты. Наличие цепи обратной связи со смесителем снижает уровень как фазового шума, так и дробных помех за счет шунтирования цепи обратной связи, содержащей делитель частоты. Наибольший уровень имеют помехи при установке частот вблизи значений, кратных частоте сравнения, когда частотная отстройка помехи оказывается в полосе пропускания петлевого фильтра. Гибкость схемы позволяет обходить данные участки спектра. Дальнейшее подавление дробных помех осуществляется делителем частоты с переменным коэффициентом деления  $N_3$ , установленным между ГУН<sub>1</sub> каскада дробного синтеза и ЧФД<sub>3</sub> объединительной петли ФАПЧ. Переменное значение коэффициента деления частоты  $N_3$  обеспечивает достаточно широкую непрерывную полосу перестройки частоты на входе ЧФД<sub>3</sub>. С этой же целью можно использовать умножитель частоты  $M_1$  и делитель частоты  $R_1$ . В большинстве микросхем ФАПЧ умножитель частоты  $M$  может принимать значения 1 или 2. Делитель частоты  $R_1$  при малых коэффициентах деления не оказывает существенного влияния на итоговые уровни фазового шума и ПСС, поэтому может быть использован для расширения диапазона перестройки частот каскада дробного синтеза. Ввиду отсутствия строгой кратности частот в объединительной петле ФАПЧ существуют определенные комбинации, приводящие к возникновению побочных спектральных составляющих в спектре выходного сигнала. Для обхода участков спектра, пораженных побочными спектральными составляющими, в схему включен каскад смещения частоты опорного сигнала, по своей структуре идентичный первому, за исключением того, что делитель частоты в цепи обратной связи работает в целочисленном режиме и, следовательно, не вносит собственных помех ввиду соблюдения кратности. Образованная сетка частот имеет неравномерный шаг, ее плотность убывает

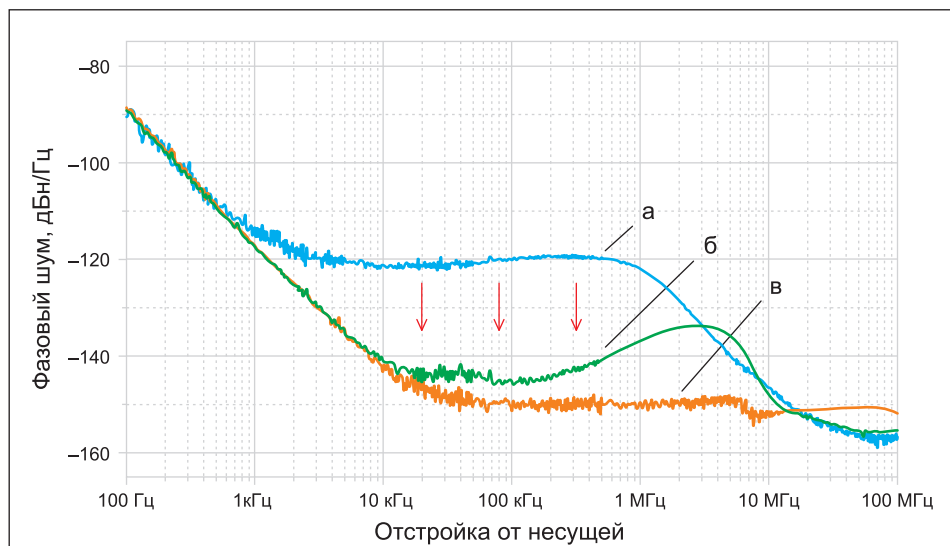


Рис. 4. Уровень фазового шума, частота 9,92 ГГц: а) типовое включение; б) с преобразованием частоты в цепи обратной связи; в) приведенный к частоте выходного сигнала фазовый шум источника опорного сигнала

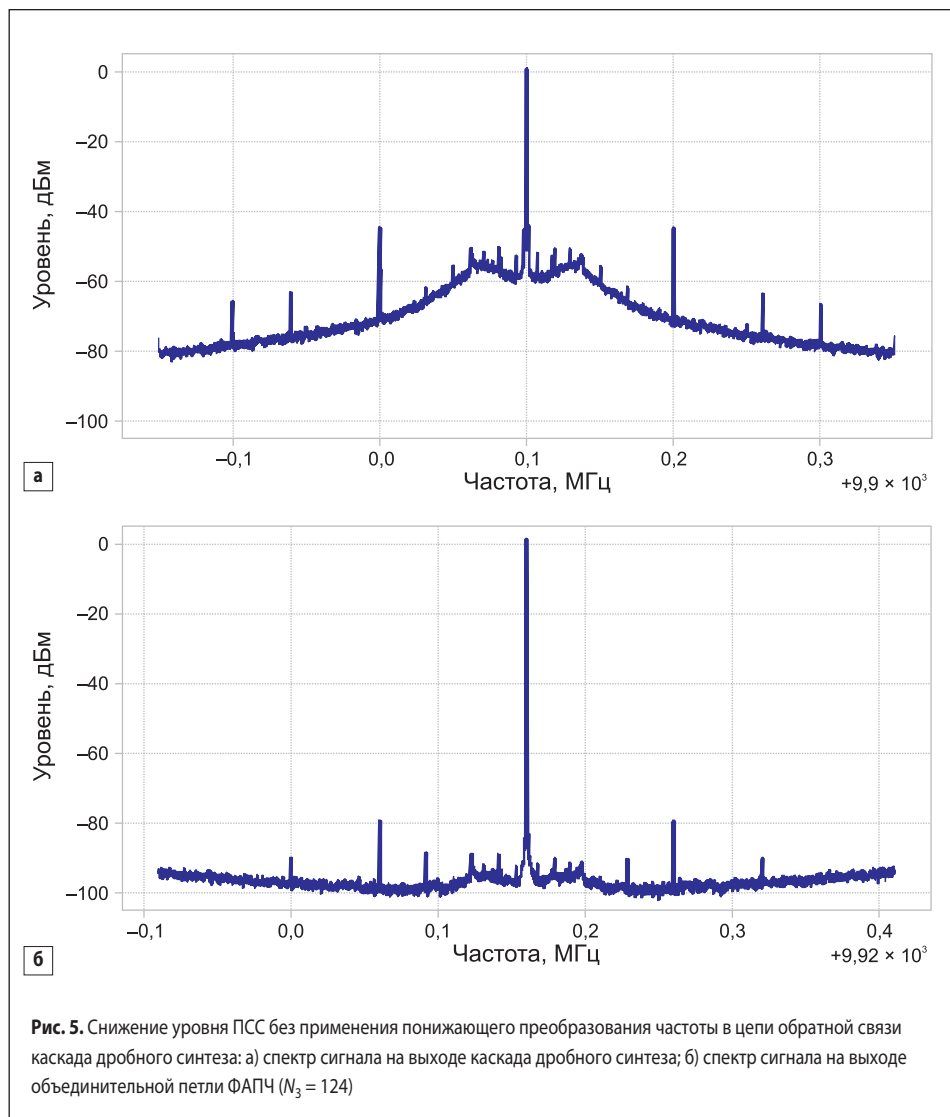


Рис. 5. Снижение уровня ПСС без применения понижающего преобразования частоты в цепи обратной связи каскада дробного синтеза: а) спектр сигнала на выходе каскада дробного синтеза; б) спектр сигнала на выходе объединительной петли ФАПЧ ( $N_3 = 124$ )

с ростом частоты сравнения. Таким образом, в результате сложения частот на выходе оконечного каскада формируется непрерывная полоса частот в СВЧ-диапазоне, заполненная мелкой сеткой. Диапазон перестройки частоты зависит от выбранных микросхем ФАПЧ и может составлять несколько сотен МГц и более. Управляемый генератор, расположенный на выходе схемы, может быть как отдельным компонентом, так и частью другой микросхемы ФАПЧ, что условно отражено пунктирной линией на схеме.

Для демонстрации возможностей по снижению уровня ПСС рассмотрим два примера. В первом примере исходный сигнал 9900,1 МГц сформирован при типовом включении микросхемы ФАПЧ с низкой частотой сравнения. Сформированный сигнал поступает на вход делителя частоты  $N_3$  объединительной петли ФАПЧ с сигналом «подставки» 10 ГГц. На рис. 5 приведены спектры исходного сигнала (5а) и сигнал на выходе объединительной петли ФАПЧ (5б) при  $N_3 = 124$ .

Как можно заметить, уровни ПСС и фазового шума исходного сигнала существенно снизились, и в данном примере можно оценить степень их подавления. Однако использовать типовое включение дробного синтезатора в штатном режиме не рекомендуется из-за сравнительно высокого уровня остаточных помех и длительного времени перестройки частоты, обусловленного малой полосой петлевого фильтра в таком включении.

В другом примере сигнал частотой 9920,1 МГц, содержащий побочные спектральные составляющие на отстройке 100 кГц от несущей частоты, сформирован каскадом с преобразованием частоты в цепи обратной связи. В приведенном случае исходный уровень побочных спектральных составляющих оказался равным примерно -80 дБ относительно несущей. На выходе оконечного каскада после деления частоты на коэффициент  $N_3 = 123$  указанные побочные составляющие оказались достаточно сильно подавлены и практически не наблюдались в установленном разрешении анализатора спектра.

Следует обратить внимание на сопутствующие сложности при построении синтезатора частот. Ввиду наличия вспомогательных источников сигнала на отличающихся частотах, требуется надлежащим образом обеспечивать развязку, особенно в узлах преобразования частот.

Кроме рассмотренной схемы, синтезатор мелкой сетки частот с сопоставимыми характеристиками может быть построен с измененным порядком включения типовых микросхем и прочими вариациями, способствующими более эффективному использованию компонентов.

**Расширение диапазона частот**

Далее рассмотрим пример формирования сигнала в широком диапазоне частот (рис. 7).

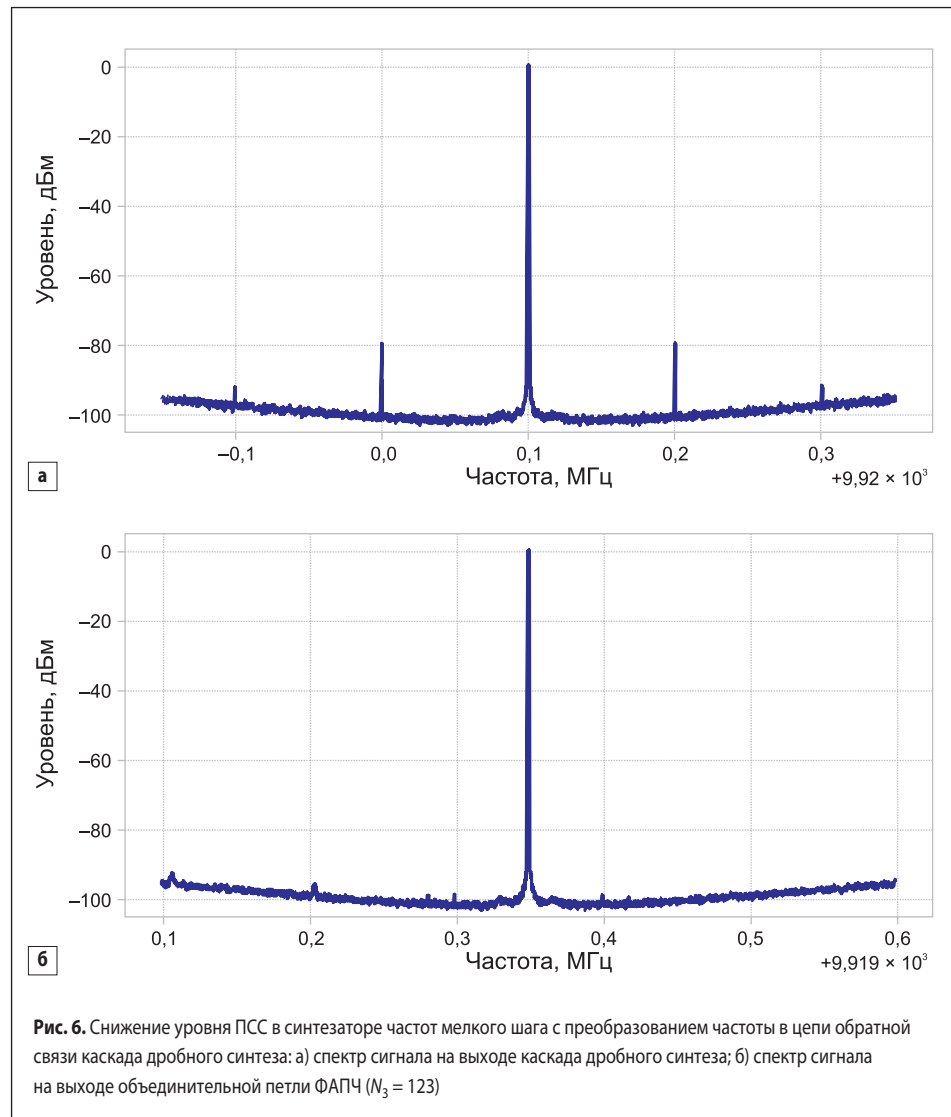
На данной схеме дополнительно введено обозначение: С — умножитель частоты.

Приведенную схему можно рассматривать как продолжение синтезатора мелкой сетки частот, выполняющего здесь роль перестраиваемого источника опорного сигнала. В схеме применяется концепция многократного преобразования частоты внутри одного кольца ФАПЧ [1, 6, 8] с соблюдением кратности частот, участвующих в синтезе. Привлекательно желание обойтись как можно меньшим числом преобразований. В данном случае их два. Тогда для покрытия октавы потребуется использовать гармоники сигнала с выхода делителя частоты  $D_4$ . Требуемый состав гармоник в большой мере зависит от диапазона перестройки источника опорного сигнала. Чем он уже, тем

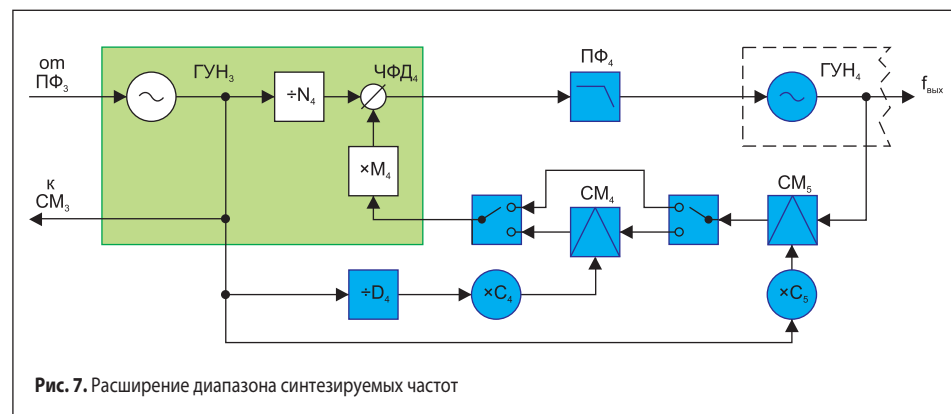
большой коэффициент деления  $D_4$  частоты необходимо использовать с более плотным размещением гармоник, что увеличивает сложность и может приводить к избыточному росту фазового шума. В общем случае для каждого набора установок в схеме расширителя диапазона частот можно записать выражение, линейно связывающее частоту выходного сигнала с входной:

$$f_{\text{вых}}(i, f_3) = k_i \cdot f_3,$$

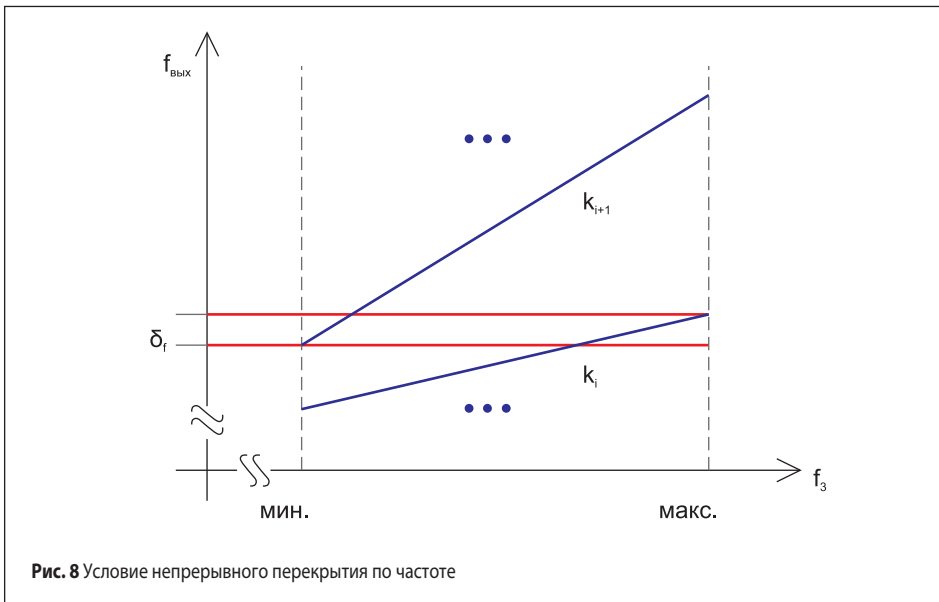
где:  $i$  — номер конфигурации установок с сортировкой в порядке возрастания коэффициентов пропорциональности  $k_i$ . Тогда



**Рис. 6.** Снижение уровня ПСС в синтезаторе частот мелкого шага с преобразованием частоты в цепи обратной связи каскада дробного синтеза: а) спектр сигнала на выходе каскада дробного синтеза; б) спектр сигнала на выходе объединительной петли ФАПЧ ( $N_3 = 123$ )



**Рис. 7.** Расширение диапазона синтезируемых частот



условие непрерывного частотного перекрытия можно записать как:

$$f_{\text{вых}}(i, f_{\text{вх.макс.}}) \geq f_{\text{вых}}(i+1, f_{\text{вх.мин.}})$$

На рис. 8 приведена графическая интерпретация данного выражения.

Требование соблюдения кратности означает, что коэффициент деления частоты  $N_4$  может принимать ограниченный набор значений, а именно тот, в котором значения  $N_4$  кратны коэффициенту деления частоты  $D_4$ .

В данной схеме также следует внимательно относиться к обеспечению надлежащей развязки, в частности для предотвращения проникновения на выход помех от вспомогательных сигналов.

### Заключение

Рассмотренный вариант схемотехнического решения показывает возможность получения высокого качества спектра сигнала в широком диапазоне частот, используя в качестве источника опорного сигнала малошумящий высо-

кочастотный генератор и серийные микросхемы ФАПЧ как элементы синтеза.

### Литература

1. Chenakin A. *Frequency Synthesizers: Concept to Product*. Artech House, Inc., 2011.
2. Бельчиков С. А. *Горизонты проектирования современных синтезаторов частот. Сборник статей XIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*. СПб., 2024.
3. Лойко В. А., Добровольский А. А., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. *Автогенераторы на поверхностных акустических волнах (обзор) // Известия вузов России. Радиоэлектроника*. 2022. Т. 25, № 3.
4. Бобкович П. И. *Малошумящий источник опорной частоты 3,2 ГГц // СВЧ-электроника*. 2021. № 3.
5. Ченакин А. В., Горевой А. В. *Практическое построение синтезаторов частоты СВЧ-диапазона*. М.: Горячая линия — Телеком, 2021.
6. Манасевич В. *Синтезаторы частот. Теория и проектирование*. Пер. с англ./Под ред. А. С. Галина. М.: Связь, 1979.
7. Рыжков А. В., Попов В. Н. *Синтезаторы частот в технике радиосвязи*. М.: Радио и связь, 1991.
8. Шапиро Д. Н., Паин А. А., *Основы теории синтеза частот*. М.: Радио и связь, 1981.
9. Горевой А. В. *Синтез частот с автосмещением в обратной связи петли ФАПЧ // Компоненты и технологии*. 2020. № 7.