

УДК 621.396.967

Н.П. Кандырин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

ВЫБОР ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СВЧ СИНТЕЗАТОРОВ С ФАПЧ

Обосновывается выбор опорных и перестраиваемых генераторов при проектировании СВЧ синтезаторов с позиций минимума уровня фазовых шумов. Рассмотрены методы расчета фазовых шумов таких генераторов и сравнение их с экспериментальными данными.

Ключевые слова: СВЧ, опорный генератор, управляемый генератор, фазовые шумы.

Введение

Постановка проблемы и анализ публикаций.

Неотъемлемым элементом большинства радиотехнических устройств являются системы синтеза частот и сигналов, что делает весьма актуальным разработку новых, более совершенных и модернизацию уже известных систем синтеза частот.

Разработка или модернизация любого синтезатора частот или сигналов включает в себя комплекс технических решений, направленных на обеспечение таких характеристик, как диапазон выходных частот, шаг и скорость перестройки по частоте, уровень фазовых шумов (ФШ) и побочных спектральных составляющих (ПСС), уровень выходной мощности, энергопотребление, габариты, вес и т.д.

Процесс проектирования СВЧ синтезаторов в каждом случае начинается с анализа требований к характеристикам спектральной чистоты и диапазону частот выходного сигнала. Исходя из этого, выбирают метод синтеза и компоненты, позволяющие удовлетворить требования в рамках выбранного метода. В СВЧ диапазоне (гигагерцовом) частот чаще всего применяется комбинированный синтез частот и сигналов с цифровой ФАПЧ. Это связано с рядом преимуществ перед другими методами: прямым аналоговым, прямым цифровым и др. Однако при проектировании умножающего кольца ФАПЧ следует учитывать, что он вносит существенный вклад в преобразование и усиление шумов всех элементов системы.

Упрощенная структурная схема синтезатора с ФАПЧ приведена на рис. 1. В состав синтезатора с ФАПЧ входят, в данном случае, генератор опорной частоты (ГОЧ), перестраиваемый генератор (ПГ) (генератор, управляемый либо напряжением, либо током), микросхема с частотно-фазовым детектором (ЧФД), петлевой фильтр нижних частот (ФНЧ) (предназначен для фильтрации помех, приходящих с опорной частотой и фильтрации гармоник) и делители частоты $N1$ и $N2$.

Диапазон выходных частот в таких синтезато-

рах определяется ПГ. Фазовые шумы в этом случае определяются всеми элементами, входящими в схему [1].

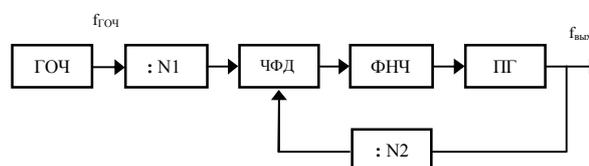


Рис. 1. Структурная схема синтезатора с ФАПЧ

С целью уменьшения шага перестройки по частоте вместо делителей часто используют цифровые синтезаторы сигналов (ЦСС).

Структурные схемы некоторых синтезаторов подобного типа рассмотрены в [2 – 4]. Принципы построения ЦСС и расчет их фазовых шумов приведены в [5, 6].

Исторически в высококачественных синтезаторах с кольцами ФАПЧ использовались подстраиваемые ЖИГ – генераторы, в которых сочетаются широкая полоса и низкий уровень фазовых шумов [7]. Кроме этого, ЖИГ – генераторы имеют линейные, хорошо воспроизводимые перестроенные характеристики, что упрощает предварительную установку частот в многокольцевых системах. Недостатками таких генераторов являются высокое энергопотребление, большие габариты и относительно высокая цена. Самый же серьезный недостаток, свойственный ЖИГ – технологии, – низкая скорость перестройки (порядка миллисекунд) из-за большой индуктивности электромагнитной системы, которая обеспечивает управление частотой.

Альтернатива ЖИГ – генераторам – генераторы, управляемые по частоте напряжением (ГУН). В отличие от ЖИГ – генераторов, они перестраиваются гораздо быстрее – можно без труда достичь скорости переключения порядка микросекунд. Габариты, энергопотребление и стоимость ГУН значительно меньше по сравнению с ЖИГ – генераторами, однако шумовые характеристики у них гораздо хуже, что может ограничивать использование ГУН в высококачественных СВЧ синтезаторах.

Целью статьи является проведение сравнительного анализа известных генераторов ГОЧ, ГУН и ГУТ по уровню фазовых шумов и формирование ключевых принципов, которыми следует руководствоваться при их использовании в разработке высокочастотных синтезаторов с ФАПЧ.

Основной материал

Выбор генераторов для синтезаторов СВЧ

Поскольку для любых синтезаторов сигналов одним из важных, а в некоторых случаях и определяющим параметром является величина фазовых шумов на его выходе, то и комплектующие элементы для них будем выбирать с минимальными фазовыми шумами. В непосредственной близости от несущей частоты, в пределах полосы пропускания петли ФАПЧ, ФШ сигнала равны сумме фазовых шумов ГОЧ, ЧФД, ФНЧ и делителей, а за пределами полосы пропускания петли - фазовым шумам ПГ.

Выбор ГОЧ

ГОЧ чаще всего выбирают исходя из требований к долговременной стабильности частоты, точности ее установки и ФШ синтезатора на ближних отстройках от несущей. На данный момент времени замены кварцевым генераторам (КГ), наверное, пока не существует. Поэтому остается только определиться с частотой КГ и выбрать из известно существующих конкретную модель, обеспечивающую необходимые фазовые шумы.

Максимальной стабильностью на больших интервалах времени обладают генераторы частотой 2 – 4 МГц. Перенос столь низкой частоты в более высокий диапазон требует высокую кратность умножения частоты, что вызывает подъем ФШ на $20 \log N$ при умножении в N раз. На данный момент времени предпочтительным источником колебаний представляется источник на основе системы ФАПЧ высокочастотного кварцевого генератора (ВЧ КГ), в качестве опоры которого используется сигнал низкочастотного прецизионного КГ, например, частотой 2,5 МГц, умноженный множителем частоты высокой кратности (УЧВК) (рис. 2).

Такой источник способен обеспечить кратковременную стабильность частоты порядка 10^{-13} (за счет низкочастотного КГ).

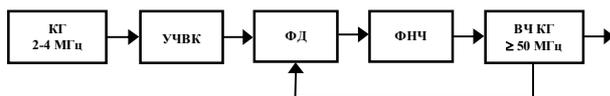


Рис. 2. ГОЧ на основе прецизионного КГ и системы ФАПЧ

В табл. 1 приведены значения ФШ для различных опорных КГ с частотой выходного сигнала 100 МГц при различных значениях отстройки частоты от несущей.

Таблица 1

Фазовые шумы ГОЧ

Отстройка от несущей	CVHD-950 100 МГц	TEMEX ULN HF BA2 100 МГц	МОХО-100 МГц
100Гц	-118	-130	-135
1кГц	-143	-158	-162
10кГц	-157	-174	-175
100кГц	-164	≤175	-176
1МГц	-168	≤175	-176
10МГц	-170	≤175	-178

Следует заметить, что ФШ синтезатора определяются не только ГОЧ, но и системой ФАПЧ. При выборе ГОЧ необходимо принимать во внимание то, что шумы, наводимые ЧФД современных микросхем, намного превышают собственные шумы ГОЧ. Например, микросхема делителей и ЧФД НМС703LP4Е на частоте сравнения 100 МГц дает уровень ФШ -135 дБ/Гц при отстройке частоты 1 МГц от несущей, в то время как относительно дешевые термостатированные КГ МОХО-100 фирмы МИКРАН имеют уровень ФШ до -176 дБ/Гц . Однако это не значит, что нельзя использовать высокочастотные КГ в простых однопетлевых синтезаторах. Из формулы для расчета ФШ наводимых ЧФД в замкнутой петле ФАПЧ следует, что увеличение частоты сравнения в два раза снижает шумы ЧФД на 3 дБ [8]. Важным также является применение аналогового фазового детектора с частотой сравнения, соответствующей частоте высокочастотного КГ. Он должен обеспечить непрерывность управляющего сигнала, и, тем самым, устранить дрожание фазы, свойственные цифровым системам ФАПЧ с низкой частотой сравнения.

Выбор ПГ

Во многих областях техники, таких как цифровая связь, автомобильные радары, радионавигация и разнообразное тестовое оборудование зачастую требования к ФШ не предъявляются. Поэтому здесь целесообразнее применять ПГ с минимальной стоимостью, габаритами и энергопотреблением. Такие генераторы строятся на простых колебательных контурах с перестройкой частоты варикапами, позволяющие выполнять практически весь синтезатор в виде небольшой интегральной схемы (ADF4350 Analog Devices или НМС833LP6GE Hittite Microwave). При этом цена ГОЧ и микросхемы ФАПЧ должна быть минимальна.

Для тех устройств, более критичных к ФШ синтезаторов, таких как анализаторы спектра, измерительные генераторы, измерители флуктуаций, РЛС с ЛЧМ сигналом и т.п., необходимо с большей осторожностью подходить к выбору управляемых генераторов. Для синтезаторов с широкой полосой перестройки (октавных) подходят генераторы с ферро-

магнитными резонаторами (ЖИГ - генераторы) или наборы переключаемых субоктавных ГУН с микроплосковыми резонаторами. Для синтезаторов с малым диапазоном перестройки или одночастотных – генераторы с резонаторами на отрезках линий передачи, ПАВ или с объемными резонаторами.

Генераторы, управляемые напряжением

Самой низкой стоимостью среди всех генераторов обладают ГУН на колебательных контурах. Основным их достоинством есть высокая повторяемость параметров, практически исключая настройку, а также стойкость к механическим воздействиям и малые габариты. Фактически габаритные размеры ГУН определяются технологическими возможностями изготовления элементов и могут быть уменьшены с помощью специальной технологии МИС, к тому же позволяющей достигать частот генерации выше 100 ГГц [9].

Еще одно достоинство ГУН – это широкая полоса пропускания канала управления частотой (до 10 МГц и выше), что позволяет строить сканирующие по частоте системы.

В табл. 2 для примера приведены характеристики двух ГУН в диапазоне 1 - 2 и 2 - 4 ГГц фирмы МИКРАН.

Таблица 2

Электрические параметры ГУН

Параметр	Модель			
	MVCO-1020		MVCO-2040	
Выходная частота, МГц	900	2100	1600	4100
ФШ при отстр.100кГц, дБ/Гц	-122	-113	-112	-106
Уровень втор. гармоники, дБ	-32	-13	-	-15
Круговая рег. харак., МГц/В	30	130	50	450

Уровень ФШ этих ГУН, как видно из экспериментально снятых зависимостей (рис. 3, а, б) и табл. 2, умеренно низкий и составляет -120 дБ/Гц и -110 дБ/Гц соответственно при отстройке 100 кГц от несущей 1 и 4 ГГц.

ФШ для промежуточных частот данного диапазона ГУН можно рассчитать по формуле из [10]:

$$S_{\text{ГУН}}(F) = \frac{10^{-13,3} \cdot f_{\text{ВЫХ}}^2}{Q^2 \cdot F^3} + \frac{10^{-16,7} \cdot f_{\text{ВЫХ}}^2}{Q^2 \cdot F^2} + \frac{10^{-13}}{F} + 10^{-16,2}$$

Для сравнения теоретических и экспериментальных зависимостей ФШ проведем расчеты, в данном случае, для частот 1 и 4 ГГц и добротности контура Q = 50.

Результаты этих расчетов приведены на рис. 4, из которых следует, что графики зависимостей СПМ ФШ снятые экспериментально и рассчитанные по формуле практически совпадают для крайних значений диапазонов.

Поэтому определить ФШ для других частот данного диапазона с определенной точностью можно расчетным путем.

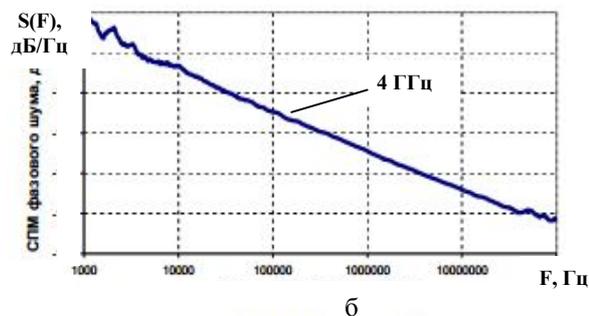
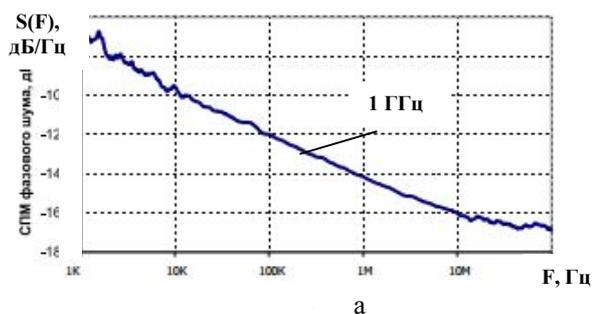


Рис. 3. Экспериментальные зависимости ФШ ГУН MVCO-1020 и MVCO-2040 на частотах 1 и 4 ГГц

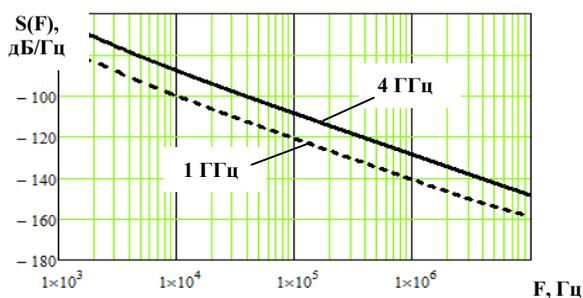


Рис. 4. Расчетные зависимости ФШ ГУН MVCO-1020 и MVCO-2040 на частотах 1 и 4 ГГц

ЖИГ – генераторы

Автономные генераторы с ЖИГ - резонаторами характеризуются пониженным уровнем ФШ, низкой чувствительностью к вибрациям и микрофонному эффекту. При изменении тока, управляющего напряженностью магнитного поля, такие генераторы обеспечивают сверхширокую перестройку частоты с малыми вариациями мощности по диапазону перестройки, низкими отклонениями модуляционной характеристики от линейности.

Основной недостаток таких генераторов – способ управления частотой сильным магнитным полем, предполагающий наличие электромагнита с большим протекающим током и большой индуктивностью катушек, ограничивающей скоростные свойства сканирующих по частоте систем с ЖИГ – генераторами. Генераторы с ЖИГ находят применение в широкополосных маломощных синтезаторах частот: первых гетеродинах анализаторов спектра и измерительных СВЧ – генераторах.

В табл. 3 приведены параметры одного из представителей ЖИГ - генератора МУТО – 3080 российской фирмы МИКРАН [11].

Таблица 3

Параметры ЖИГ – генератора

Модель МУТО-3080	
Параметр	Значение
Частотный диапазон, ГГц	3 - 8
Уровень второй гармоники, дБ	- 8
Фазовый шум при отстройке 100 кГц, дБ/Гц	- 130

Данная модель способна генерировать колебания в широком диапазоне частот (от 3 до 8 ГГц). Как следует из описания, этот генератор обладает высокой линейностью регулировочной характеристики и низким ФШ: -130 дБ/Гц при отстройке 100 кГц от несущей во всем диапазоне рабочих частот. На рис. 5 представлены экспериментально снятые шумовые характеристики этого ЖИГ – генератора.

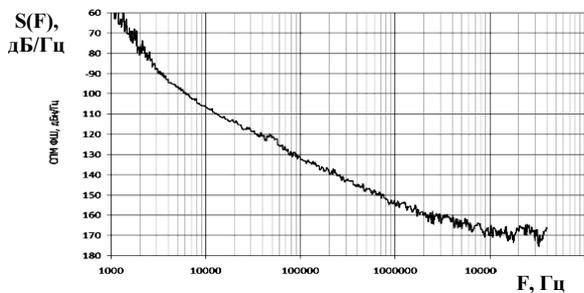


Рис. 5. Экспериментальные зависимости ФШ ЖИГ - генератора МУТО-3080

Еще одним представителем, выпускающим автономные генераторы с ЖИГ – резонаторами является корпорация Micro Lambda Wireless. Поставляется линейка моделей с частотой от 1 до 50 ГГц.

Micro Lambda Wireless выпускает 21 семейство ЖИГ – генераторов с электромагнитом (ЭМ) и 10 семейств генераторов с постоянным магнитом (ПМ). Параметры некоторых ЖИГ – генераторов из этого семейства приведены в табл. 4. Здесь уровень СПМ ФШ приведен вблизи несущей частоты при отстройке на 100 кГц.

Таблица 4

Основные параметры ЖИГ – генераторов корпорации Micro Lambda Wireless

Параметр			
Модель	$f_{\text{ниж.}} - f_{\text{верх.}}$, ГГц	СПМ ФШ дБ/Гц	Прим.
MLMY-0702	0,7 - 2	- 105	ЭМ
MLTM-50308	3 - 8	- 128	ЭМ
MLXS-0220T	2 - 20	- 128	ЭМ
MLPW-1822	18 - 22	- 100	ПМ
MLOS-2640	26,5 – 40	не аттестовано	ЭМ

Сопоставленные зависимости СПМ ФШ от частоты отстройки для автогенераторов на полевом

(ПТ) и биполярном транзисторе (БТ) с ЖИГ – резонатором приведены на рис. 6.

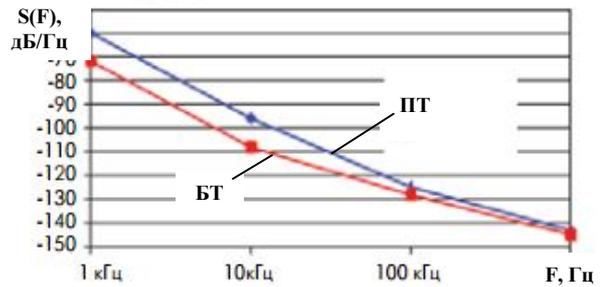


Рис. 6. СПМ ФШ от частоты отстройки для автогенераторов на ПТ и БТ с ЖИГ - резонатором

Из приведенных таблиц и рисунков не всегда понятно, для каких частот указанных диапазонов производились замеры ФШ. Поэтому, как и в предыдущем случае с ГУН, попытаемся, для сравнения, смоделировать ФШ для ЖИГ – генераторов теоретическим путем.

Поскольку существенное отличие ГУН от ЖИГ – генераторов заключается в применении колебательных систем с очень низкой добротностью (до 100), а все остальные параметры для ГУН и ЖИГ совпадают, поэтому выше приведенную формулу для ГУН можно использовать для моделирования шумовых характеристик ЖИГ [12, 13]. При этом добротность ЖИГ – резонаторов составляет порядка 2000 – 3000 и выше. За счет высокой добротности ЖИГ – резонаторов и проявляется существенный выигрыш по шумовым характеристикам.

Сравнение теоретических расчетов и экспериментальных данных показало, что на начальном промежутке частот отстройки (до 10 кГц) наблюдается видимое отличие в сторону уменьшения ФШ при теоретических расчетах. Причиной тому, по всей видимости, является то, что формула не учитывает влияния частотного шума случайных блужданий (слагаемого $1/F^4$). Такие шумы обычно связаны с воздействием на генератор окружающей среды (температуры, вибрации, ускорения, ударные воздействия и т.п.). Таким образом, с учетом данной составляющей модель для расчета СПМ ФШ ЖИГ – генераторов будет иметь следующий вид:

$$S_{\text{ЖИГ}}(F) = \frac{10^{-7,0} \cdot f_{\text{ВЫХ}}^2}{Q^2 \cdot F^4} + \frac{10^{-13,3} \cdot f_{\text{ВЫХ}}^2}{Q^2 \cdot F^3} + \frac{10^{-16,7} \cdot f_{\text{ВЫХ}}^2}{Q^2 \cdot F^2} + \frac{10^{-13,0}}{F} + 10^{-16,2}$$

Шумовые характеристики, рассчитанные с помощью данной модели, приведены на рис. 7 (для ЖИГ - генераторов с выходной частотой 3 – 8 ГГц) и на рис. 8 (для ЖИГ – генераторов с выходной частотой 20 – 40 ГГц корпорации Micro Lambda Wireless).

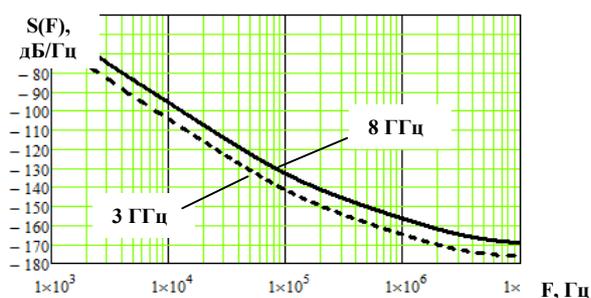


Рис. 7. Расчетные зависимости ФШ ЖИГ – генераторов на частотах 3 и 8 ГГц

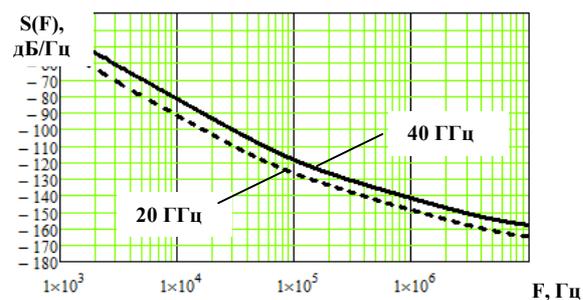


Рис. 8. Расчетные зависимости ФШ ЖИГ – генераторов на частотах 20 и 40 ГГц

Сравнение теоретических расчетов по данной модели показали хорошее совпадение с экспериментальными данными. Однако как видно уровень ФШ неодинаков для всего частотного диапазона. Так для диапазона частот 3 – 8 ГГц ФШ изменяются от -140 до -130 дБ/Гц, а не как записано в паспортных данных -130 дБ/Гц во всем диапазоне.

Уровень СПМ ФШ вблизи несущей для генераторов с ЖИГ – резонатором в среднем на 8 – 10 дБ ниже, чем у генераторов с микрополосковой колебательной системой.

Генераторы на коаксиальных резонаторах

Генераторы на коаксиальных резонаторах (КР), добротность которых находится на уровне 500, позволяют получить уровень ФШ до -153 дБ/Гц на отстройке 100 кГц от несущей 2,5 ГГц при типовой перестройке частоты не более 0,5%.

Основное применение таких ГУН – в качестве маломощных источников сигналов фиксированной частоты, например, в фиксированных гетеродинах приемных трактов с многократным преобразованием частоты или в системах связи и радиолокации со сложными сигналами (с ЛЧМ).

При этом генераторы с КР обладают достаточной технологичностью, так как монтаж резонатора и элементов связи (конденсаторов) выполняется на печатной плате. Было установлено, что уровень ФШ генератора зависит от качества элементов связи. Так керамические конденсаторы общего применения серии GRM Murata [14] ограничивают ФШ на уровне -140 дБ/Гц, а при замене на специальные конден-

саторы для СВЧ серии GQM Murata ФШ снижается на 10 дБ.

Генераторы на диэлектрических резонаторах

Диэлектрические резонаторы (ДР) таких генераторов, самые добротные из доступных и дешевых резонаторов гигагерцового диапазона. Добротность их на частоте 4 ГГц достигает 10000 и выше, поэтому генераторы с таким резонатором позволяют получить уровень ФШ до -160 дБ/Гц на отстройке 100 кГц. Однако такие генераторы имеют небольшие возможности по электронному управлению частотой – не более 10^{-4} . Некоторые особенности построения генераторов на ДР [15] делают их устройствами с относительно низкой технологичностью и поэтому массового применения, кроме спутниковых конверторов, они не находят.

Генераторы на лейкосапфировых резонаторах

Лейкосапфировые резонаторы, работающие в режиме «шепчущей галереи», обладают высокой собственной добротностью: до 150-200 тысяч на частоте 10 ГГц, при применении комбинированной стабилизации частоты (КСС) – выше миллиона, что позволяет строить генераторы СВЧ с уникально высокой стабильностью частоты [16].

К недостаткам этих резонаторов, прежде всего, нужно отнести большие габариты, высокую зависимость частоты от температуры и высокую стоимость. Генераторы с такими резонаторами пока не нашли широкого применения в технике и используются, скорее, в исследовательских целях или в единичных разработках типа стандартов частоты на цезиевых пучках.

Выводы

Осведомленность разработчика о современном уровне развития элементной базы для синтезаторов частоты и сигналов является одним из факторов, определяющих эффективность будущего синтезатора. Например, низкодобротные колебательные контуры позволяют октавную перестройку частоты, более добротные микрополосковые – до 20 – 30%, коаксиальные керамические резонаторы – 0,5%, диэлектрические резонаторы – на 10^{-4} , а кварцевые и лейкосапфировые – всего на 10-15 ppm. Генераторы на ЖИГ – резонаторах – единственные ГУТ, у которых добротность остается неизменно высокой при перестройке частоты до декады. В широкополосных синтезаторах применяются УГ с колебательными контурами, микрополосковыми и ЖИГ – резонаторами, а узкополосных или одночастотных – КР, ДР, ПАВ и т.п.

Поэтому, основные принципы при проектировании маломощных и имеющих малое время переключения синтезаторов с ФАПЧ, в которых используются ГУН, можно сформулировать таким образом:

- использовать источники опорной частоты с минимальными фазовыми шумами;
- уменьшать собственные шумы ФАПЧ;
- расширять в разумных пределах полосу пропускания фильтра в кольце ФАПЧ.

Заметим, что скорость переключения частот зависит не только от динамики главного кольца, но и от других модулей синтезатора и цепей цифрового управления его работой.

Как правило, она указывается в пределах 100 мкс, и гарантируется при переключении с любой исходной частоты на любую заданную в пределах всего рабочего диапазона. Такая скорость переключения намного превосходит скорость переключения, достижимую в обычно используемых синтезаторах с ЖИГ – генераторами.

Еще одним преимуществом применения ГУН вместо ЖИГ – генераторов является то, что они мало чувствительны к вибрациям. Это является результатом малой массы используемого ГУН и очень широкой полосы фильтра в кольце ФАПЧ.

В целом синтезатор с ГУН занимает мало места, что позволяет получить устройства на их основе небольших габаритов.

Список литературы

1. Кандырин Н.П. Перспективы использования комбинированных формирователей на основе ФАПЧ и ЦСС для формирования СВЧ сигналов. Фазовые шумы системы ФАПЧ / Н.П. Кандырин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУ ПС, 2014. – Вып. № 2 (39). – С. 70-73.
2. Кандырин Н.П. Анализ фазовых шумов комбинированных синтезаторов сигналов / Н.П.Кандырин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУ ПС, 2014. – Вып. 3 (40). – С. 63-68.
3. Кандырин Н.П. Исследование фазовых шумов системы ФАПЧ со смесителем в цепи обратной связи / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2014. – Вып. 8 (124). – С. 30-32.
4. Кандырин Н.П. Шумовые характеристики двухкольцевой системы ИФАПЧ с преобразованием частоты внутри кольца / Н.П. Кандырин // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – № 4 (17). – С. 77-81.
5. Кандырин Н.П. Цифровые вычислительные синтезаторы простых и сложных сигналов / Н.П. Кандырин // Збірник наукових праць Об'єднаного науково-дослідного інституту Збройних Сил. – Х.: ОНДІ ЗС, 2006. – Вып. 2 (4). – С. 135-144.
6. Кандырин Н.П. Собственные фазовые шумы цифровых вычислительных синтезаторов сигналов / Н.П. Кандырин // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУ ПС, 2014. – №. 2 (38). – С. 99-102.
7. Hellszajn j. YIG resonators and filters / Hellszajn j. – New York^ Wiley, 1985.
8. Кандырин Н.П. Шумовые характеристики комбинированного синтезатора сигналов на основе однокольцевой системы ФАПЧ со смесителем и ЦСС / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2014. – Вып. 9 (125). – С. 35-38.
9. Nicolson S.T. et.al. Design and scaling of SiGe BiCMOS VCOs above 100 GHz. Bipolar / BiCMOS Circuits and Technology Meeting, 2006.
10. Кандырин Н.П. Фазовые шумы кварцевых генераторов и генераторов, управляемых напряжением / Н.П. Кандырин // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – №2(15). – С. 127-129.
11. МУТО-3080 ЖИГ – генератор [Электронный ресурс]: сайт фирмы НПФ МИКРАН. URL: <http://www.micran.ru/productions/svch/oscillators/>.
12. Ченакин А. ГУН или ЖИГ? Проблема выбора при проектировании высококачественного синтезатора с ФАПЧ / А. Ченакин // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2012. – № 6.
13. Рыжков А.В. Синтезаторы частот в технике радиосвязи / А.В. Рыжков, В.Н. Попов. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с., ил.
14. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: www.murata.com.
15. Tanski W.J. Development of a low-noise L-band dielectric resonator oscillator / W.J. Tanski // IEEE International frequency control symposium, 1994.
16. McNeilage C. et. al. A review of sapphire whispering gallery-mode oscillators including technical progress and future potential of technology. www.psi.com.au

Поступила в редколлегию 28.03.2015

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

ВИБОР ГЕНЕРАТОРІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ НВЧ СИНТЕЗАТОРІВ З ФАПЧ

М.П. Кандирін

Обґрунтовується вибір опорних і перебудованих генераторів при проектуванні НВЧ синтезаторів з позицій мінімуму рівня фазових шумів. Розглянуті методи розрахунку фазових шумів таких генераторів і порівняння їх з експериментальними даними.

Ключові слова: НВЧ, опорний генератор, керований генератор, фазові шуми.

THE CHOICE OF GENERATORS AT THE DESIGNING OF MICROWAVE PLL SYNTHESIZERS

N.P. Kandyrin

The choice of supporting and reconstructed generators is grounded at planning SHF synthesizers from phase noises level minimum point of view. The methods of such generator phase noises calculation and comparison theoretical results with experimental data are considered.

Keywords: SHF, supporting generator, guided generator, phase noises.