

Анализ параметрической чувствительности формирователя сигналов на основе ЦВС с автокомпенсацией фазовых помех

Наиболее распространенными методами подавления помех на выходе цифрового вычислительного синтезатора частот (ЦВС) является фильтрация выходного сигнала синтезатора, а также компенсация данных помех. Метод автоматической компенсации помех сочетает достоинства предыдущих, такие как простота схемы и возможность компенсации помех с частотой, близкой к основной частоте сигнала, и может применяться вместе с фильтрацией [1]. Исследованная в работе [1] схема автокомпенсатора фазовых помех (АК) с регулированием по отклонению обладает статической ошибкой компенсации, ограниченным быстродействием и проблемой устойчивости при больших коэффициентах регулирования, что ограничивает максимальную частоту синтезируемого сигнала ЦВС.

Структурная схема формирователя сигналов на основе АК с регулированием по возмущению (РВ) (рис. 1) содержит устройство управления задержкой (УУЗ), опорный тракт (ОТ), информационный тракт (ИТ), управляющий тракт (УТ) и фазовый детектор (ФД). Также на схеме обозначены ОГ - опорный генератор, УЧ1 – входной умножитель частоты на ФАПЧ, УЧ2 – выходной умножитель частоты на биполярном транзисторе, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь в составе ЦВС, ПФ – полосовой фильтр для выделения основной частоты ЦВС или ее образа. Шумовые характеристики АК с РВ существенно зависят от коэффициента регулирования, что определяет необходимость исследования чувствительности устройства к изменению данного параметра.

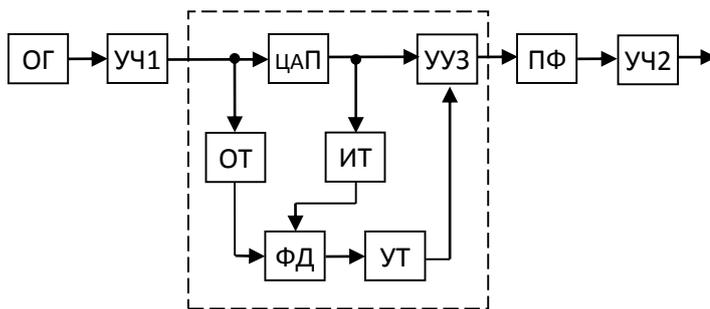


Рис. 1

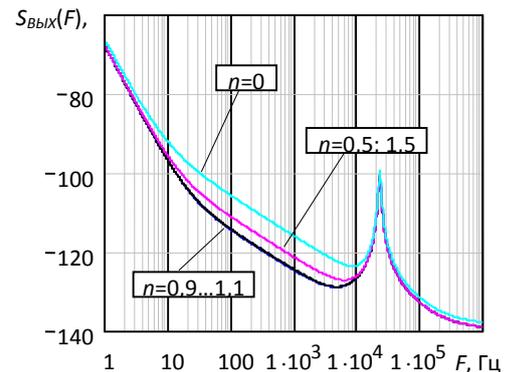


Рис. 2

Тракты ОТ и ИТ формируют прямоугольные импульсы с одинаковой амплитудой и частотой на входах ФД. Управляющий тракт УТ состоит из фильтра нижних частот (ФНЧ) и усилителя постоянного тока (УПТ). Паразитное фазовое отклонение выходного сигнала ЦВС может быть скомпенсировано противофазным изменением задержки сигнала в УУЗ.

Зависимость спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых флуктуаций на выходе формирователя от частоты отстройки F при воздействии некоррелированных помех отдельных блоков имеет вид

$$S_{\text{вых}}(F) = \{S_{\text{ог}}(F)N_{\text{уч1}}^2 H_{31}^2(F) + S_{\text{уч1}}(F) + S_{\text{ууз}}(F) + S_{\text{упт}}(F)K_{\text{ууз}}^2 + S_{\text{фд}}(F)K_{\text{упт}}^2 K_{\text{ууз}}^2 |M_1(F)|^2 + 2S_{\text{тр}}^*(F) + S_{\text{цвс}}(F) \times |H_{\text{ак}}(F)|^2\} N_{\text{уч2}}^2 + S_{\text{уч2}}(F), \quad (1)$$

где символами S обозначены СПМ фазовых флуктуаций соответствующих блоков, K с нижним индексом - коэффициент передачи соответствующего блока формирователя, $N_{\text{уч1}}$ и $N_{\text{уч2}}$ - коэффициенты умножения УЧ1 и УЧ2, $S_{\text{тр}}^*(F)$ - шумовой вклад Т-триггеров в ОТ и ИТ, $H_{\text{ак}}(p) = 1 - N_1 M_1(p)$ - передаточная функция АК по внешним шумам, N_1 - коэффициент регулирования по возмущению, $M_1(p)$ - коэффициент передачи ФНЧ в УТ.

Модель фазового шума УЧ1 на ФАПЧ $S_{\text{уч1}}(F)$ и передаточная функция ФАПЧ по внешним шумам $H_{31}(p)$ приведены в [3]. Использованные соотношения для расчета СПМ собственных фазовых шумов опорного кварцевого генератора, цифрового фазового детектора и делителя

Секция 7. Машиностроение и материаловедение

частоты, высокочастотного усилителя представлены суммой рациональных функций от частоты отстройки в [4]. В качестве модели СПМ фазовой помехи УУЗ используется шумовая модель высокочастотного усилителя. Для расчета СПМ фазового шума генератора, управляемого напряжением, системы ФАПЧ при произвольной отстройке от несущей использована степенная аппроксимация табличных шумовых параметров ГУН модели ROS-244+, взятых с сайта фирмы Mini-Circuits. Также используется выражение, аппроксимирующее СПМ фазового шума ЦВС модели AD9854 [3].

Моделирование проводилось для следующих значений параметров блоков формирователя: $f_{ог} = 100$ МГц, $K_{ЦВС} = 0,31$, $N = 12$, $N_{уч1} = 2$, $N_{уч2} = 5$, частоты среза ФНЧ автокомпенсатора и ФАПЧ – 100 кГц и 10 кГц соответственно, $K_{ФД} = K_{УУЗ} = 1$, $K_{ГУН} = 4$ МГц/В.

На основе сравнения слагаемых выражения (1) определено, что наибольший вклад в уровень фазового шума на выходе формирователя вносят УУЗ, УПТ, ОГ и УЧ1 [1, 2]. В отличие от варианта автокомпенсатора с регулированием по отклонению [], в рассматриваемом устройстве фазовые помехи УУЗ и УПТ не подавляются из-за отсутствия цепи обратной связи, Помеха ЦВС в значительной мере (до 80 дБ/Гц при малых отстройках от несущей) подавляется в цепи автокомпенсации.

Зависимости СПМ фазовых флуктуаций на выходе формирователя от частоты отстройки $S_{вых}(F)$ показаны на рис. 2. Исследования проводились при различных значениях коэффициента регулирования $n = n_{УПТ} / (2K_{ЦВС})$, где $n_{УПТ}$ – коэффициент усиления УПТ; кривая $n = 0$ соответствует отсутствию компенсации, $n = 1$ – условию полного подавления помехи ЦВС.

Установлено, что степень компенсации фазовой помехи ГСЧ максимальна при условии полного подавления помехи ЦВС $n_{УПТ} = 2K_{ЦВС}$ и достигает 6,8 дБ/Гц при частоте отстройки $F = 200$ Гц. При изменении n происходит уменьшение степени компенсации: на 0,75 дБ/Гц при уменьшении или увеличении n на 0,2 ($n = 0,8 \dots 1,2$). Требования к точности установки коэффициента усиления УПТ при разработке формирователя по схеме рис. 1 и изменения данного коэффициента при перестройке выходной частоты ЦВС существенно менее жесткие по сравнению с гибридным синтезатором [5]. Проведенный анализ шумовых свойств формирователя подтвердил эффективность предложенной схемы устройства при соблюдении данных требований.

Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-05542.

Литература

1. Курилов И.А., Рудаков А.М., Харчук С.М., Романов Д.Н. Математическое моделирование автокомпенсации фазовых помех на выходе ЦАП прямого цифрового синтезатора частот. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №2 (10), 2013. – С. 19-25.
2. Васильев Г.С., Курилов И.А., Харчук С.М. Моделирование нелинейного автокомпенсатора фазовых помех ЦАП прямого цифрового синтезатора частот. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №2, 2014. – С. 30-38.
3. 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. №1, 2014. – С. 5-20.
4. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
5. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Kuzichkin O.R., Surzhik D.I., Kharchuk S.M. The analysis of the parametric sensitivity of a hybrid frequency synthesizer with autocompensating phase noise / 25th International Crimean Conference on Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2015). – Sevastopol, September 6 – 12, 2015. – pp. 209-211. – IEEE Catalog Number: CFP15788-PRT, CFP15788-CDR. – ISBNs: 978-1-4673-9413-0 (CD), 978-1-4673-9414-7, 978-1-4673-9415-4.