

УДК 621.396

КОМПЕНСАЦИЯ ИСКАЖЕНИЙ ЦВС В ГИБРИДНЫХ СИНТЕЗАТОРАХ ЧАСТОТ

Суржик Дмитрий Игоревич

аспирант кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Курилов Игорь Александрович

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

Васильев Глеб Сергеевич

аспирант кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: kh@mivlgu.ru.

Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

Аннотация: Предложены три варианта схем гибридных синтезаторов частот на основе ФАПЧ и цифрового вычислительного синтезатора с автоматической компенсацией фазовых искажений. Снижение уровня фазовых искажений гибридных синтезаторов достигается путем выделения закона паразитного фазового отклонения сигнала цифрового вычислительного синтезатора и изменения модулирующего напряжения управляемого генератора системы ФАПЧ в соответствии с выделенным законом отклонения фазы. Получены уравнения разработанных устройств, их передаточные функции, сформулированы условия полной компенсации фазовых искажений синтезаторов.

Ключевые слова: цифровой вычислительный синтезатор, ЦВС, гибридный синтезатор частот, ФАПЧ, компенсация фазовых искажений.

Широкое распространение в настоящее время получили прямой цифровой и косвенный методы синтеза частот [1]. Гибридный метод синтеза [2] позволяет сочетать достоинства обоих методов и получить более качественные показатели устройства.

Известно несколько вариантов построения схем гибридных синтезаторов частот (ГСЧ) на основе цифровых вычислительных синтезаторов частот (ЦВС) и системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). При этом структура ГСЧ определяется местом «включения» цифрового синтезатора. Так, ЦВС может использоваться в качестве опорного генератора (ОГ) ФАПЧ, в качестве генератора подставки системы ФАПЧ и в качестве делителя частоты с переменным коэффициентом деления (ДПКД) частоты сигнала генератора, управляемого напряжением (ГУН) [3, 4].

Сигнал на выходе ЦВС содержит искажения - паразитные амплитудные и фазовые отклонения. Амплитудные искажения в меньшей

степени оказывают влияние на качество выходного сигнала синтезатора. Фазовые искажения приводят к появлению значительных искажений выходного сигнала синтезатора, что соответствует образованию в спектре ЦВС многочисленных побочных компонент. При отсутствии помех во входном сигнале основными источниками появления паразитных составляющих в спектре являются шумы дискретизации и квантования в узлах синтезатора, а также непосредственно цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Среди других помех, являющихся источником фазового шума, можно выделить джиттер интерфейса и каждого блока ЦВС в отдельности, а также различные дестабилизирующие факторы [5, 6]. В спектре ЦВС появляются гармоники основной частоты, ряд периодических побочных составляющих и высокочастотные побочные компоненты.

Для подавления локальных искажений используют рандомизацию, добавление к фазо-

вой информации псевдослучайного шума, передискретизацию, другие сложные схемотехнические решения [7]. Часто применяется пассивная фильтрация, которая, однако, обладает низким коэффициентом подавления искажений и не подавляет побочные компоненты, попадающие в полосу пропускания выходного фильтра.

Исследования показали, что перспективным методом борьбы с фазовыми помехами является их автоматическая компенсация [8, 9]. Противофазное управление задержкой (фазой) опорного сигнала ЦВС осуществляется с помощью устройства управляемой задержки. В схемах гибридных синтезаторов подстройка фазы выходного сигнала ГСЧ может быть выполнена изменением модулирующего напряжения управляемого генератора системы ФАПЧ.

На рис. 1-3 соответственно представлены следующие структурные схемы ГСЧ с автокомпенсацией фазовых искажений (АФИ): ЦВС используется в качестве ОГ; в качестве

ДПКД в цепи обратной связи; в качестве генератора подставки системы ФАПЧ. На схемах обозначено: ДЦ - дифференцирующая цепь, Тр - триггер, ДВ - двухполупериодный выпрямитель, ФД - фазовый детектор, ФНЧ - фильтр нижних частот, ИУПТ - инвертирующий усилитель постоянного тока, С - сумматор, См - смеситель, ДФКД - делитель с фиксированным коэффициентом деления, ФЦ - выходной фильтр ЦВС, ТК - тракт компенсации.

Принцип действия АФИ гибридных синтезаторов основан на выделении закона паразитного отклонения фазы выходного сигнала ЦВС, его инверсии и последующем сложении выделенного помехового сигнала с управляющим сигналом ГУН системы ФАПЧ. Рассмотрим схему рис. 1.

Для выделения паразитного отклонения фазы выходного сигнала ЦВС, необходимо привести к одинаковой форме входной сигнал ЦВС и ступенчатый сигнал с фазовым отклонением на выходе ЦАП ЦВС, чтобы они отличались только фазовыми (временными) сдви-

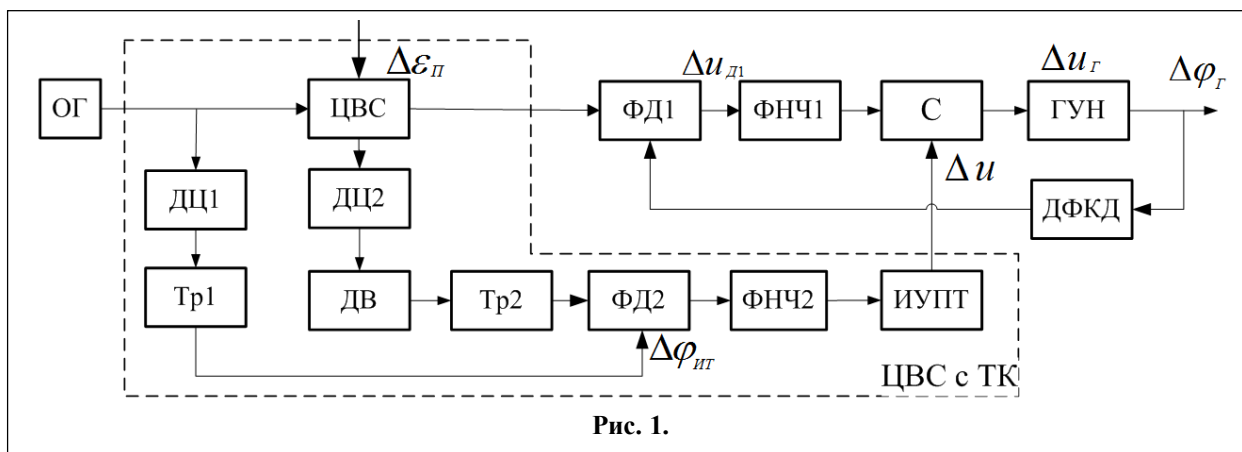


Рис. 1.

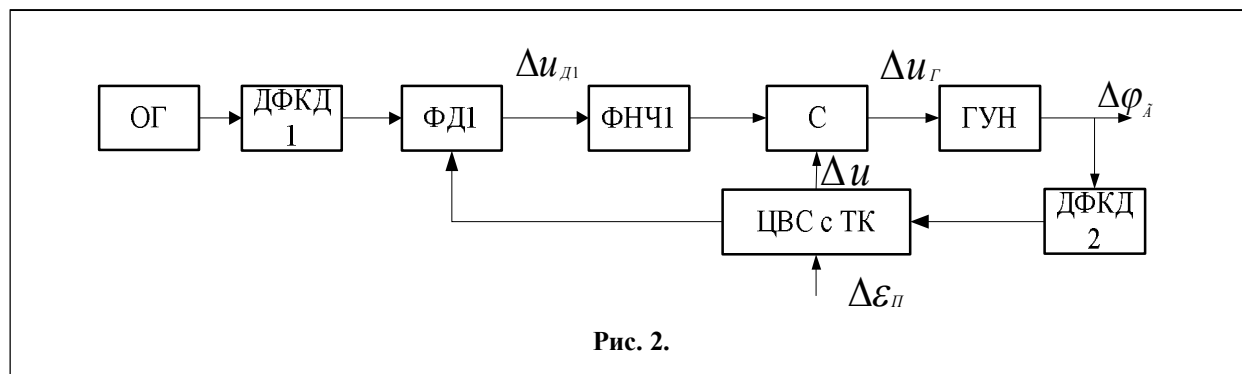


Рис. 2.

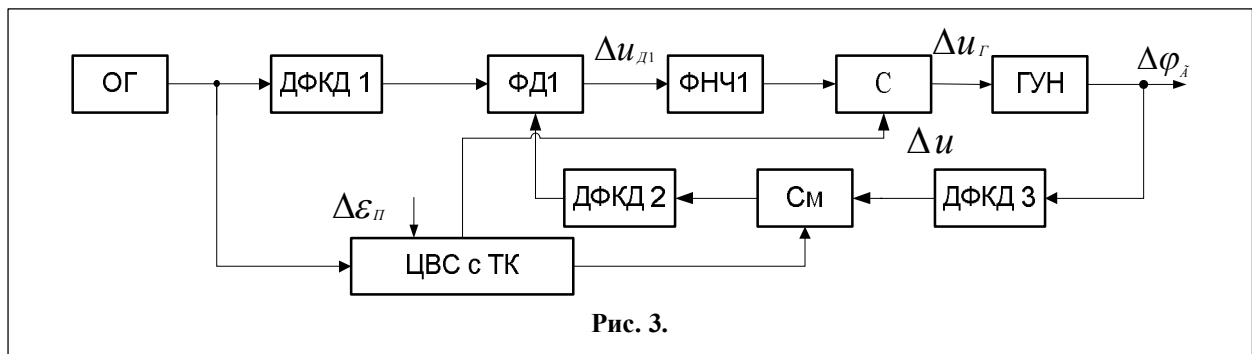


Рис. 3.

гами. Это осуществляется в опорном (ДФКД 1, Тр1) и информационном (ДФКД 2, ДВ и Тр2) трактах автокомпенсатора. Сигналы обоих трактов сравниваются по фазе в ФД2. В результате получается сигнал, пропорциональный отклонению фазы, а на выходе управляющего тракта (ФНЧ2 и ИУПТ) формируется компенсационный сигнал. Этот сигнал при помощи С вводится в управляющее напряжение ГУН и компенсирует искажения выходного сигнала синтезатора. Принцип действия автокомпенсации в схемах рис. 2 и 3 аналогичен рассмотренному.

На схемах также обозначено: $\Delta u_{г}$ – приращение управляющего сигнала ГУН, $\Delta u_{д1}$ и $\Delta u_{д2}$ – приращения сигналов на выходах ФД1 и ФД2, $\Delta \phi_{г}$ и $\Delta \phi_{д}$ – фазовые отклонения на выходах ГСЧ и ЦВС, $\Delta \phi_{ит}$ и $\Delta \phi_{от}$ – фазовые отклонения на выходах опорного и информационного трактов, $\Delta \epsilon_{п}$ – дестабилизирующие факторы, воздействующие на ЦВС (аккумулятор фазы, ЦАП), приведенные к ЦАП.

В общем случае дифференциальное уравнение, описывающее поведение устройства в динамическом режиме, является нелинейным, имеет произвольный порядок и не имеет общего решения. Применение разработанного авторами математического аппарата на основе непрерывных кусочно-линейных функций (НКЛФ) [10-12] позволяет получить для формирователей сигналов с произвольными нелинейными характеристиками составляющих звеньев выражения передаточных характеристик [13,14], количественно и качественно исследовать устойчивость [15,16], частотные и динамические свойства устройств [17-21].

Данный подход используем и для анализа гибридных синтезаторов.

Аппроксимируем характеристики нелинейных звеньев ГСЧ при помощи НКЛФ. Характеристики ФД1, ФД2 и ГУН в общем виде, после аппроксимации можно представить в виде

$$y(x) = \sum_{l=0}^{L-1} [K_l x + B_l] Q_l(x),$$

где $K_l = \frac{Y(X_{l+1}) - Y(X_l)}{\Delta_x}$, $B_l = Y(X_l) - K_l X_l$ –

коэффициенты отрезков прямых в узле аппроксимации l , L – максимальный номер узла аппроксимации; x – значение разности фаз на входах 1-го или 2-го фазовых детекторов или управляющее напряжение ГУН; Δ_x – шаг аппроксимации аргумента НКЛФ x , X_l – значение x в узле аппроксимации с номером l , $Y_l = Y(X_l)$ – значение нелинейной характеристики в узле X_l ,

$$Q_l(x) = \frac{1}{2\Delta} \sum_{\lambda=0}^1 \sum_{\gamma=0}^1 (-1)^{\lambda+\gamma} |x - X_l - \gamma\Delta_x + \Delta(1-\lambda)| -$$

функция включения отрезков аппроксимирующих прямых, $\Delta \rightarrow 0$ – произвольно малое число, λ, γ – параметры.

Функция включения $Q_l(x)$ отлична от нуля и равна единице только на интервале между узлами $(l; l+1)$. Проведенная аппроксимация позволяет проводить исследования и получать выражения характеристик ГСЧ для произвольных рабочих точек ФД1, ФД2 и ГУН).

Рассмотрим случай, когда влияние нестабильностей амплитуды незначительно и может не учитываться. При малых величинах фазовых флуктуаций максимальные отклонения параметров звеньев ГСЧ находятся в пределах участков аппроксимации с одним номером.

Тогда $B_l = 0$ и $K_l = K^*$, где $K^* = K_{Д1}$, или $K^* = K_{Д2}$, или $K^* = K_{Г}$ - крутизны характеристик ФД1, ФД2 и ГУН на отрезке аппроксимации $l...l+1$.

Обозначим $M_{1,2}(p)$ - коэффициенты передачи ФНЧ1,2, где p - оператор Лапласа, и составим уравнения для кусочно - линейризованной модели ГСЧ с автокомпенсацией, и ЦВС в качестве опорного генератора ФАПЧ (рис.1). Отклонение фазы ГУН на выходе ГСЧ определяется выражением

$$-\Delta\varphi_{Г} = K_{Г}\Delta u_{Г}/p. \quad (1)$$

Сигнал $\Delta u_{Г}$ определим как

$$\Delta u_{Г} = \Delta u_{Д1}M_1(p) + \Delta u. \quad (2)$$

Выражение для приращения сигнала на выходе ФД1

$$\Delta u_{Д1} = K_{Д1}(\Delta\varphi_{П} + \Delta\varphi_{Г}/N_2), \quad (3)$$

где N_2 - коэффициент деления ДФКД.

Определим $\Delta\varphi_{П}$, как воздействие дестабилизирующего фактора с коэффициентом $K_{П}$

$$\Delta\varphi_{П} = \Delta\varepsilon_{П}K_{П}. \quad (4)$$

Тогда выражение (2) с учетом (3) и (4) примет вид

$$\Delta u_{Г} = K_{Д1}(\Delta\varepsilon_{П}K_{П} + \Delta\varphi_{Г}/N_2)M_1(p) + \Delta u, \quad (5)$$

$$\Delta u = -nM_2(p)K_{Д2}\Delta\varphi_{ИТ}, \quad (6)$$

где n - коэффициент усиления ИУПТ.

$$\Delta\varphi_{ИТ} = \Delta\varphi_{П}K_{ИТ} = \Delta\varphi_{П}/2K_{ЦВС}, \quad (7)$$

где $K_{ИТ}$ - коэффициент передачи информационного тракта по фазе, $K_{ЦВС}$ - коэффициент передачи ЦВС.

Выражение для управляющего сигнала (6) с учетом (4) и (7)

$$\begin{aligned} \Delta u &= -nM_2(p)K_{Д2}\Delta\varepsilon_{П}K_{П} - \\ &- nM_2(p)K_{Д2}\Delta\varepsilon_{П}K_{П}/2K_{ЦВС} = \\ &= N_K^*M_2(p)\Delta\varepsilon_{П}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $N_K^* = nK_{Д2}K_{П}/2K_{ЦВС}$.

Подставим (8) в (5)

$$\Delta u_{Г} = \Delta\varepsilon_{П}\alpha + K_{Д1}M_1(p)\Delta\varphi_{Г}/N_2, \quad (9)$$

где $\alpha = K_{Д1}K_{П}M_1(p) - N_K^*M_2(p)$.

Преобразуем (1) с учетом (9)

$$\Delta\varphi_{Г}\left(1 + \frac{K_{Г}K_{Д1}M_1(p)}{N_2p}\right) = -\Delta\varepsilon_{П}\frac{K_{Г}\alpha}{p}. \quad (10)$$

Из дифференциального уравнения (10) получим передаточную функцию ГСЧ с АФИ «фаза-фаза» по дестабилизирующему фактору ЦВС

$$H_{\Delta\varepsilon_{П}\Delta\varphi_{Г}} = \frac{\Delta\varphi_{Г}}{\Delta\varepsilon_{П}} = \frac{-N_{П}\frac{M_1(p)}{p} + N_A\frac{M_2(p)}{K_{ЦВС}p}}{1 + \frac{M_1(p)}{T_c p}}, \quad (11)$$

где $T_c = N_2/K_{Г}K_{Д1}$ - собственная постоянная времени ФАПЧ, $N_{П} = K_{Г}K_{Д1}K_{П}$ - коэффициент передачи искажений, $N_A = nK_{Г}K_{Д1}K_{П}/2$ - коэффициент регулирования АФП.

Условие полного подавления искажений ЦВС определяется равенством нулю числителя передаточной функции устройства (11)

$$-N_{П}M_1(p)/p + N_A M_2(p)/K_{ЦВС}p = 0. \quad (12)$$

Решая равенство (12), получим условия полной компенсации $\Delta\varepsilon_{П}$

$$n = 2K_{ЦВС}, \quad M_2(p) = M_1(p). \quad (13)$$

Аналогичным образом получаем дифференциальное уравнение ГСЧ с АФИ (рис. 2) и его передаточную функцию для искажений

$$\Delta\varphi_{Г}\left(1 + \frac{K_{Г}K_{Д1}K_{ЦВС}M_1(p)}{N_2p}\right) = -\Delta\varepsilon_{П}\frac{K_{Г}\alpha}{p}; \quad (14)$$

$$H_{\Delta\varepsilon_{П}\Delta\varphi_{Г}} = \frac{\Delta\varphi_{Г}}{\Delta\varepsilon_{П}} = \frac{-N_{П}\frac{M_1(p)}{p} + N_A\frac{M_2(p)}{K_{ЦВС}p}}{1 + \frac{K_{ЦВС}M_1(p)}{T_c p}}. \quad (15)$$

Условия полного подавления фазовых искажений для схемы рис. 2 также определяются равенствами (13).

Для схемы рис. 3 дифференциальное уравнение и передаточная функция синтезатора примут вид

$$\Delta\varphi_{Г}\left(1 + \frac{K_{Г}K_{Д1}M_1(p)}{N_2N_3p}\right) = -\Delta\varepsilon_{П}\frac{K_{Г}\alpha}{p}, \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{K_{д1}K_{п}M_1(p)}{N_2} - N_K^*M_2(p);$$

$$H_{\Delta\varepsilon_{п}\Delta\varphi_{Г}} = \frac{\Delta\varphi_{Г}}{\Delta\varepsilon_{п}} = \frac{-N_{п}\frac{M_1(p)}{N_2p} + N_A\frac{M_2(p)}{p}}{1 + \frac{M_1(p)}{T_c p}}. \quad (17)$$

При этом условие полного подавления $\Delta\varepsilon_{п}$ для схемы рис. 3 определяется как

$$n = 2K_{цвс}/N_2 \text{ и } M_1(p) = M_2(p). \quad (18)$$

Таким образом, в статье предложены три варианта схем ГСЧ с автокомпенсацией фазовых искажений ЦВС, использующегося в качестве опорного генератора, делителя частоты в цепи обратной связи и генератора подставки системы ФАПЧ. На основе полученных соотношений для исследуемых схем сформулированы условия полной компенсации фазовых искажений ЦВС в составе ГСЧ. Показана эффективность применения принципа автоматической компенсации для подавления искажений на выходе ГСЧ.

Литература

1. Белов Л. А. / Формирование стабильных частот и сигналов: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 224 с.
2. Ченакин А. / Частотный синтез: текущие решения и новые тенденции. – Электроника: наука, технология, бизнес, №1, 2008.
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. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Якименко К.А., Коровин А.Н. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на интегральных микросхемах // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 1 (9). - С. 10-15.
5. Kester W. Evaluating High Speed DAC Performance. – Analog Devices Tutorial 2009. <http://www.analog.com/media/cn/training-seminars/tutorials/MT-013.pdf>.
6. Алешин Г.В., Бойко Д.А. Влияние уровней порога и помех на параметры джиттера в цифровых системах. // Сборник научных статей Украинской государственной академии железнодорожного транспорта, 2010, №116. - С. 5-10.

7. Ямпурин Н. П. Формирование прецизионных частот и сигналов: Учеб. пособие. Ямпурин Н. П., Болознев В. В., Сафонова Е. В., Жалнин Е. Б. – Нижегород. гос. техн. ун-т. Нижний Новгород, 2003. 187 с.

8. 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.

9. 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.

10. Курилов И.А., Ромашов В.В., Жиганова Е.А., Романов Д.Н., Васильев Г.С., Харчук С.М., Суржик Д.И. Методы анализа радиоустройств на основе функциональной аппроксимации.// Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 1 (13). - С. 35-49.

11. Курилов И.А., Романов Д.Н., Харчук С.М. Аппроксимация характеристик и сигналов на основе включающих непрерывных кусочно-линейных функций. // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2007. № 8. - С. 7-11.

12. Курилов И.А. Анализ устройств амплитудно-фазового преобразования сигналов на основе непрерывных кусочно-линейных функций.// Радиотехника. 2006. № 11. - С. 55-60.

13. Курилов И.А., Васильев Г.С., Харчук С.М. Передаточные характеристики нелинейного преобразователя сигналов. //Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 1. № 1. - С. 80-84.

14. Курилов И.А., Васильев Г.С., Харчук С.М. Моделирование преобразователя сигналов с комбинированным регулированием на основе передаточных характеристик. //Проектирование и технология электронных средств. 2011. № 1. С. 34-37.

15. Васильев Г.С., Курилов И.А., Харчук С.М., Суржик Д.И. Исследование устойчивости преобразователя сигналов на основе непрерывных кусочно-линейных функций. //Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 1. - С. 4-7.

16. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Kharchuk S.M. Analysis of parametrical stability of the amplitude-phase converter with various filters. //2013 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2013 - Proceedings. 2013.

17. Курилов И.А., Васильев Г.С., Харчук С.М. Исследование переходных процессов амплитудно-фазовых преобразователей спектральным методом на основе НКЛФ. //Методы и устройства передачи и обработки информации. 2009. № 11. - С. 72-78.

18. Курилов И.А., Васильев Г.С., Харчук С.М. Анализ динамических характеристик преобразователей сигналов на основе непрерывных кусочно-

линейных функций. – Научно-технический вестник Поволжья. 2010. № 1. - С. 100-104.

19. Курилов И.А., Васильев Г.С., Харчук С.М. Анализ динамических режимов амплитудно-фазовых преобразователей при различных входных воздействиях. //2011 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)/ Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, September 15-16, 2011. – P. 293 – 296.

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

Поступила 15 сентября 2015 г.

20. Курилов И.А., Ромашов В.В. Переходные режимы амплитудно-фазового преобразователя четвертого порядка // Радиотехника. 2008. № 9. - С. 94-98.

21. Курилов И.А., Ромашов В.В., Васильев Г.С. Статические характеристики гистерезисных амплитудно-фазовых преобразователей сигналов // Радиотехника. 2009. № 11. - С. 86-88.

English

DCS distortions compensation in hybrid frequency synthesizers

Dmitry Igorevich Surzhik - post-graduate student Department of Radio Engineering Murom Institute (branch) "Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov".

Igor Aleksandrovich Kurilov – Candidate of Engineering, Associate Professor Murom Institute (branch) "Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov".

Gleb Sergeyeovich Vasilyev - post-graduate student Department of Radio Engineering Murom Institute (branch) "Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov".

E-mail: kh@mivlgu.ru.

Address: Orlovskaya st., 23, Murom, 602264.

Abstract: Synthesis hybrid method is under consideration here combining advantages of direct frequency digital synthesis and phase-lock loop based frequency synthesis. Signal at direct digital synthesizer output contains parasitic amplitude and phase deviations. Special attention is given to undesired phase deviations which affect most output signal spectral purity and bring about considerable distortions that corresponds to occurrence of numerous extraneous frequency components in spectrum. Three versions of structural diagrams for hybrid frequency synthesizers with phase distortions automatic compensation are developed. Direct digital synthesizer is used in these diagrams as phase-lock loop reference generator, as frequency divider with variable multiplicity of signal frequency division in voltage controlled generator, and as offset signal generator in phase-lock system with frequency mixer. Phase noise level reduction of hybrid synthesizers is achieved via evolving law of parasitic phase signal deviation in direct digital synthesizer and via change of controlled generator modulating voltage in phase-lock system under effect of evolved law of parasitic phase deviation. Direct digital synthesizer input signal enters automatic compensator reference path, and output signal with undesired spectral components enters automatic compensator data path. Direct phase interference separation and subsequent compensating signal generation is conducted in automatic compensator's phase detector. Operation equations and transfer functions are obtained for proposed hybrid synthesizers diagrams. Operational efficiency of automatic compensation principle is shown and conditions for complete compensation of destabilizing perturbations impact on hybrid frequency synthesizer output signal are indicated.

Key words: digital computing synthesizer, DCS, hybrid frequency synthesizer, PLL, phase distortion compensation.

References

1. Belov L. A. Stable frequencies and signals generation: Manual for higher educational institution students. - M Izdatelsky tsentr «Akademiya», 2005. – 224 p.

2. Chenakin A. Frequency synthesis: current solutions and new trends. - Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes, No. 1, 2008.

3. Romashov V. V., Romashova L.V., Khranov K.K., Doktorov A.N., Yakimenko K.A. Noise performances modeling of hybrid frequency synthesizers.// Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. No. 1, 2014. – P. 5-20.

4. Romashov V.V., Romashova L.V., Yakimenko K.A., Korovin A.N. Modeling of noise performances of hybrid frequency synthesizers on integral chips. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. 2013. № 1 (9). P. 10-15.

5. Kester W. Evaluating High Speed DAC Performance. - Analog Devices Tutorial 2009. <[http://www. analog.com/media/cn/training-seminars/tutorials/MT-013.pdf](http://www.analog.com/media/cn/training-seminars/tutorials/MT-013.pdf)>.
6. Alyoshin G.V., Boiko D.A. Effect of threshold levels and noises on jitter parameters in digital systems. - Sbornik nauchnykh statey Ukrainskoy gosudarstvennoy akademii zheleznodorozhnoy transporta, 2010, No. 116, p. 5-10.
7. Yampurin N.P. Precision frequencies and signals generation: Manual. Yampurin N.P., Boloznev V.V., Safonova E.V., Zhalnin E.B. - Nizhegorod. gos. tekhn. un-t. Nizhny Novogrod, 2003. 187 p.
8. Kurilov I.A., Rudakov A.M., Harchuk S.M., Romanov D. N. Mathematical modeling of phase noises automatic compensation at DAC output of direct digital frequency synthesizer. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. No. 2 (10), 2013. – P. 19-25.
9. Vasilyev G. S., Kurilov I.A., Harchuk S. M. Nonlinear automatic compensator modeling of DAC phase noises in direct digital frequency synthesizer. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. No. 2, 2014. – P. 30-38.
10. Kurilov I.A., Romashov V.V., Zhiganova E.A., Romanov D. N., Vasilyev G. S., Harchuk S.M., Surzhik D. I. Analysis methods of radio devices based on functional approximation. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. 2014. No. 1 (13). P. 35-49.
11. Kurilov I.A., Romanov D. N., Harchuk S. M. Characteristics and signals approximation based on switching in continuous piecewise linear functions. - Metody i ustroystva peredachi i obrabotki informatsii. 2007. No. 8. P. 7-11.
12. Kurilov I.A. Devices analysis of amplitude-phase signal conversion based on continuous piecewise linear functions. - Radiotekhnika. 2006. No. 11. P. 55-60.
13. Kurilov I.A., Vasilyev G. S., Harchuk S. M. Transfer characteristics of nonlinear signal converter. - Voprosy radioelektroniki. 2010. T. 1. No. 1. P. 80-84.
14. Kurilov I.A., Vasilyev G. S., Harchuk S. M. Modeling of signal converter with combined control based on transfer characteristics. - Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv. 2011. No. 1. P. 34-37.
15. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Harchuk S.M., Surzhik D. I. Research of signal converter stability based on continuous piecewise linear functions. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. 2012. No. 1. P. 4-7.
16. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Kharchuk S.M. Analysis of parametrical stability of amplitude-phase converter with various filters. - 2013 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2013 - Proceedings. 2013.
17. Kurilov I.A., Vasilyev G.S., Harchuk S.M. Transient processes research of amplitude - phase converters via CPLF-based spectral method. -Metody i ustroystva peredachi i obrabotki informatsii. 2009. No. 11. P. 72-78.
18. Kurilov I.A., Vasilyev G.S., Harchuk S.M. Dynamic characteristics analysis of signal converters based on continuous piecewise linear functions. - Nauchno-tekhnichesky vestnik Povolzhya. 2010. No. 1. P. 100-104.
19. Kurilov I.A., Vasilyev G. S., Harchuk S. M. Dynamic modes analysis of amplitude-phase converters under different input effects. - 2011 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)/Proceedings. - Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 15-16, 2011. - p. 293 - 296.
20. Kurilov I.A., Romashov V.V. Transitional modes of fourth-order amplitude-phase converter. - Radiotekhnika. 2008. No. 9. P. 94-98.
21. Kurilov I.A., Romashov V.V., Vasilyev G.S. Static characteristics of the hysteresis amplitude-phase signal converters. - Radiotekhnika. 2009. № 11. - P. 86-88.