

### Анализ абсолютной устойчивости системы подавления помех цифровых синтезаторов частот в нелинейном режиме на основе критерия Попова

Активными источниками фазовых и (в меньшей мере) амплитудных помех цифровых вычислительных синтезаторов частот (ЦВС) является каждый отдельно взятый блок ЦВС (накопитель фазы, блок памяти отсчетов  $\sin/\cos$ , цифро-аналоговый преобразователь ЦАП) и интерфейсы между блоками. К многочисленным факторам, вызывающим рост фазовых помех, относятся: шумы квантования, дискретизации, вызванные конечной разрядностью цифровых блоков синтезатора и погрешности преобразования ЦАП; переходные процессы ЦАП, вызывающие выбросы выходного сигнала при смене управляющего кода; джиттер отдельных звеньев синтезатора и интерфейсов между блоками. Меры по снижению уровня фазовых помех на выходе ЦВС зачастую ограничиваются пассивной фильтрацией, которая имеет ряд существенных недостатков, а в частности весьма низкий коэффициент подавления помех вне полосы пропускания фильтра.

Повысить стабильность выходной частоты синтезатора позволяет использование системы подавления помех (СПП). Структурная схема СПП содержит: устройство управления задержкой (фазой) сигнала тактового генератора, тракты формирования опорного и информационного сигналов, фазовый детектор, фильтр и усилитель постоянного тока. Недостатком СПП является наличие обратной связи, что определяет необходимость проверки системы на устойчивость.

В [1,2] на основе частотного критерия Найквиста получены аналитические выражения устойчивых коэффициентов  $N_2$  преобразователя сигналов в линейном режиме («в малом») для различных фильтров в цепи обратной связи. В настоящей работе приводятся полученные обобщенные соотношения для анализа абсолютной устойчивости СПП в нелинейном режиме («в целом») на основе критерия Попова и кусочно-линейной аппроксимации годографа устройства. Применение непрерывных кусочно-линейных функций (НКЛФ) [1,2] позволяет выполнить анализ устойчивости системы с различными типами и порядками фильтра.

Нижнее  $\tilde{N}_2^H$  и верхнее  $\tilde{N}_2^B$  граничные значения коэффициента регулирования (коэффициента петлевого усиления цепи обратной связи) соответствуют границам устойчивости нелинейной СПП:

$$\tilde{N}_2^H = \max\{k_{m,n}[1 - \tilde{q}(k_{m,n})]\}, \quad \tilde{N}_2^B = \min\{k_{m,n}\tilde{q}(k_{m,n})\},$$

где переключающая НКЛФ  $\tilde{q}(\vartheta) = \frac{1}{2\Delta} [|\vartheta + \Delta| - |\vartheta - \Delta|]$  принимает значение 1 при  $\vartheta \geq 0$  и 0 при  $\vartheta < 0$ ,

$\Delta \rightarrow 0$  - малый параметр [1],  $k_{m,n} = -1/b_{m,n}Q_{m,n}(b_{m,n})$ ,  $b_{m,n}$  - абсциссы прямых, аппроксимирующих годограф комплексной передаточной функции фильтра, включающая НКЛФ

$Q_{m,n}(\vartheta) = \frac{1}{2\Delta} \sum_{\lambda=0}^1 \sum_{\gamma=0}^1 (-1)^{\lambda+\gamma} |\vartheta + \vartheta_n - \vartheta_m(1-\gamma) - \Delta\lambda|$  принимает значение 1, если ее аргумент принадлежит

участку  $[\omega_n; \omega_m]$ , и 0 – в противном случае.

Годограф изменяется наиболее быстро в области малых значений частоты и медленно – при больших. Для уменьшения погрешности расчета граничных коэффициентов расположение узлов аппроксимации годографа  $\omega_n$  и  $\omega_m$  выполнено по экспоненциальному закону.

Анализ устойчивости нелинейной СПП с фильтром нижних частот (ФНЧ) различного порядка (от 1-го до 10-го включительно) показал, что области устойчивой работы СПП в линейном режиме («в малом») и в нелинейном режиме («в целом») совпадают для данного типа фильтра. Каждый фильтр состоит из одинаковых каскадно соединенных RC-звеньев. Нижнее граничное значение коэффициента регулирования одинаково для любого порядка ФНЧ и равно  $-1$ . Система с ФНЧ 1-го и 2-го порядка теоретически сохраняет устойчивость при произвольном увеличении коэффициента регулирования (на практике значение коэффициента ограничено из-за влияния паразитных параметров). С ростом порядка фильтра области устойчивости сужаются сверху (от 8 для ФНЧ 3-го порядка до 1,652 для ФНЧ 10-го

порядка).

Получены выражения, определяющие граничные значения коэффициента регулирования по отклонению, соответствующего устойчивой работе СПП «в целом» (при больших величинах дестабилизирующих воздействий). Применение НКЛФ позволяет исследовать на основе обобщенных соотношений абсолютную устойчивость устройств подавления помех с различным типом и порядком фильтра в цепи обратной связи.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-05542.*

#### **Литература**

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

2. Васильев Г.С. Исследование устойчивости амплитудно-фазового преобразователя на основе частотного критерия. – Научный потенциал молодежи - будущее России [Электронный ресурс]: IV Всероссийские научные Зворыкинские чтения. Сб. тез. докладов IV Всероссийской молодежной научной конференции. Муром, 12 апреля 2013 г. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2013. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).