

О ДЕЙСТВИИ ПОМЕХ НА СИНХРОНИЗИРУЕМЫЙ ГЕНЕРАТОР В СИСТЕМЕ ЦИФРОВОГО ЧАСТОТНОГО СИНТЕЗА

*О. И. Губернаторов, А. Н. Зеленин,
Е. Л. Демьянкова*

Харьков

Системы цифрового частотного синтеза (СЦЧС) на основе ФАПЧ находят все более широкое применение благодаря использованию в них микромодульных и интегральных элементов.

Упрощенная функциональная схема цифрового синтезатора приведена на рис. 1. Сигнал от опорного высокостабильного генератора ОГ с частотой ω_1 поступает на формирующее устройство ФУ, на выходе которого создается последовательность импульсов с частотой следования, равной ω_1 .

Полученная таким образом последовательность импульсов поступает на вход делителя частоты следования импульсов D_1 с коэффициентом деления K_1 . В системах цифрового частотного синтеза делители частот чаще всего выполняются на основе триггерных декад.

Полученная на выходе делителя частоты последовательность импульсов с частотой следования, равной $\frac{\omega_1}{K_1}$, поступает на один

вход фазового детектора, выполненного по триггерной схеме с отдельным запуском.

На другой вход фазового детектора поступает последовательность импульсов с частотой следования $\frac{\omega_2}{K_2}$ (ω_2 — частота синхронизируемого генератора СГ; K_2 — коэффициент делителя с переменным коэффициентом деления), полученная путем аналогичного преобразования колебания синхронизируемого генератора.

Если частоты следования импульсов на входах фазового детектора (триггера) равны, на выходе ФД появляются импульсы с такой же частотой следования, причем длительность выходных импульсов зависит от величины фазового сдвига в 1 и 2 каналах.

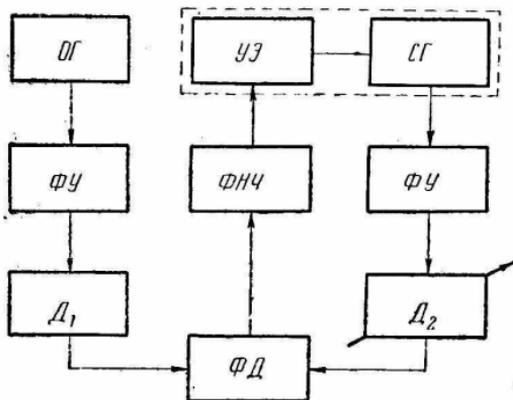


Рис. 1.

Если частоты следования импульсов на входах ФД не равны, на выходе ФД появится последовательность широтно модулированных импульсов. В скорости нарастания (убывания) длительности импульсов на выходе ФД

заклучена информация о частотных соотношениях $\frac{\omega_1}{K_1}$ и $\frac{\omega_2}{K_2}$.

Постоянная составляющая напряжения этой импульсной последовательности выделяется фильтром нижних частот (ФНЧ) и используется для воздействия на управляющий элемент синхронизируемого генератора. Управляющий элемент, реактивное сопротивление которого является функцией приложенного напряжения, изменяет частоту синхронизируемого генератора, переводя систему в режим, при котором

$$\frac{\omega_1}{K_1} = \frac{\omega_2}{K_2}. \quad (1)$$

Подробнее система описана в работе [1], поэтому переходим непосредственно к рассмотрению действия шума на синхронизируемый генератор в системе цифрового частотного синтеза.

При рассмотрении вопроса о флуктуационных изменениях частоты СГ в СЦЧС при воздействии на систему шума целесообразно наложение на СЦЧС и ее параметры начальных условий, при которых остальные дестабилизирующие факторы можно не учитывать.

К таким начальным условиям следует отнести следующее:

1. ОГ и СГ (без системы ФАПЧ) высокостабильны, т. е. собственными флуктуациями частот ОГ и СГ можно пренебречь.

2. Амплитуды сигналов ОГ и СГ, а также пороги срабатывания формирующих устройств в каналах одинаковы, т. е.

$$A_{m_1} = A_{m_2}; C_1 = C_2.$$

3. Фазовые задержки в делителях частоты отсутствуют.

В СЦЧС на основе ФАПЧ широкое распространение получили разнообразные пороговые устройства (триггеры со счетным входом в качестве делителей частоты, триггеры с отдельным входом в качестве фазовых детекторов, триггеры Шмитта в качестве формирующих устройств и др.), запускаемые полезным сигналом. При сопровождении полезного сигнала шумом приходится анализировать воздействие на пороговые устройства полезного сигнала совместно с шумами. Влияние последних на работу пороговых устройств зависит от отношения порогового напряжения срабатывания к интенсивности шума и от параметров полезного сигнала.

В СЦЧС уровень помех практически доведен до пределов, когда ложные срабатывания пороговых устройств маловероятны. Поэтому самым существенным паразитным следствием от воздействия шума следует считать дрожание моментов срабатывания порогового устройства. Последнее срабатывает при достижении на входе полезным сигналом $S(t)$ определенного напряжения — уровня срабатывания C . При воздействии на входе порогового устройства полезного сигнала с шумом наблюдается дрожание моментов срабатывания, причем это дрожание тем меньше, чем больше крутизна пускового сигнала [2].

В канале 2 (рис. 1) наименьшая крутизна пускового сигнала на входе ФУ (пусковой сигнал — синусоида). Далее по каналу следуют импульсные пусковые сигналы с достаточно большой крутизной фронтов. Поэтому дрожание фронтов импульсов на входе ФД со стороны СГ в основном определяется дрожанием фронтов ФУ. Исходя из этого наиболее обоснованно изучение вопроса о действии шума на СГ в СЦЧС, считая точкой приложения шума вход ФУ (рис. 1).

Предположим, что на вход ФУ поступает сумма гармонического колебания

$$S(t) = A_{m_2} \cos(\omega_2 t + \gamma) \quad (2)$$

и нормального стационарного шума $\xi(t)$ с нулевым средним и функцией корреляции:

$$K_\xi(\tau) = \sigma^2 R(\tau), \quad (3)$$

где σ^2 — дисперсия;

$R(\tau)$ — коэффициент корреляции.

Тогда

$$\eta(t) = A_{m_2} \cos(\omega_2 t'_0 + \gamma) + \xi(t). \quad (4)$$

В отсутствие шумов, т. е. при $\xi(t) = 0$, моменты возникновения фронтов импульсов на выходе ФУ (t'_0 и t'_1) могут быть определены из уравнений

$$\begin{aligned} S(t'_0) &= A_{m_2} \cos(\omega_2 t'_0 + \gamma) = C; \\ S(t'_1) &= A_{m_2} \cos(\omega_2 t'_1 + \gamma) = C. \end{aligned} \quad (5)$$

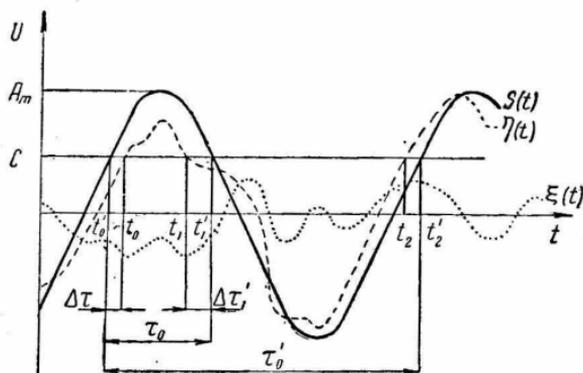


Рис. 2.

При шуме малой интенсивности ($\sigma \ll A_m$) точка прохождения уровня C процессом $\eta(t)$ смещается во времени на некоторую величину относительно времени прохождения этого уровня процессом $S(t)$ (рис. 2)

$$\begin{aligned} t_0 &= t'_0 + \Delta\tau_1; \\ t_1 &= t'_1 - \Delta\tau'_1 \text{ и т. д.} \end{aligned} \quad (6)$$

В этом случае

$$\begin{aligned} \eta(t'_0 + \Delta\tau_1) &= S(t'_0 + \Delta\tau_1) + \xi(t'_0 + \Delta\tau_1) = C; \\ \eta(t'_1 - \Delta\tau'_1) &= S(t'_1 - \Delta\tau'_1) + \xi(t'_1 - \Delta\tau'_1) = C. \end{aligned} \quad (7)$$

Итак, смещение $\Delta\tau$ — величина случайная, изменяющаяся от реализации $\xi(t)$ к реализации. Поэтому $\Delta\tau$ может быть положительно, отрицательно и равно нулю.

Поскольку шум $\xi(t)$ мал, величина $\Delta\tau$ также мала, поэтому левую часть уравнений (7) можно разложить в окрестности точек пересечения $\eta(t)$ и C в степенные ряды и ограничиться линейными относительно $\Delta\tau$ членами.

После этого в результате преобразований по методике, изложенной в работе [3], найдем дисперсию длительности импульсов на выходе ФУ:

$$\sigma_{\tau}^2 = \frac{2\sigma^2}{\omega_2^2 (A_{m_2}^2 - C^2)} [1 + R(\tau_0)], \quad (8)$$

где $R(\tau_0)$ — коэффициент корреляции функции $\xi(t)$ на интервале τ_0 .

Деление частоты следования импульсов на выходе ФУ осуществляется триггерами со счетным запуском, причем каждый импульс на выходе триггера получается следующим образом: его передний фронт формируется воздействием переднего фронта i -го импульса на выходе ФУ, а задний — воздействием переднего фронта $(i + 1)$ -го импульса.

Таким образом, дрожание фронтов i -го и $(i + 1)$ -го импульсов будет трансформировано в дрожание фронтов импульса на выходе триггера ($K_2 = 2$).

В этом случае дисперсия длительности импульсов на выходе импульсного делителя частоты запишется так:

$$\sigma_{\tau(K_2=2)}^2 = \frac{2\sigma^2}{\omega_2^2 (A_{m_2}^2 - C^2)} [1 + R(\tau_0)],$$

по аналогии

$$\sigma_{\tau(K_2=4)}^2 = \frac{2\sigma^2}{\omega_2^2 (A_{m_2}^2 - C^2)} [1 + R(2\tau_0)];$$

$$\sigma_{\tau(K_2=8)}^2 = \frac{2\sigma^2}{\omega_2^2 (A_{m_2}^2 - C^2)} [1 + R(4\tau_0)];$$

(9)

$$\dots \dots \dots \sigma_{\tau(K_2)}^2 = \frac{2\sigma^2}{\omega_2^2 (A_{m_2}^2 - C^2)} \left[1 + R\left(\frac{K_2}{2} \tau_0\right) \right].$$

Учитывая, что

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} R(\tau) = 0$$

(это обеспечивается равенством условий возникновения переднего и заднего фронтов у импульсов на выходе порогового устройства), запишем (9) при больших коэффициентах деления ($K \gg 1$) в виде

$$\sigma_{\tau(K_2)}^2 = \frac{2\sigma^2}{\omega_2^2 (A_{m_2}^2 - C^2)}. \quad (10)$$

Последовательность прямоугольных импульсов с постоянной амплитудой, средней длительностью

$$\frac{K_2}{2} \tau_0 \quad (11)$$

и дисперсией

$$\sigma_{\tau(K_2)}^2 = \frac{2\sigma^2}{\omega_2^2 (A_{m_2}^2 - C^2)} \left[1 + R\left(\frac{K_2}{2} \tau_0\right) \right]$$

поступает на один вход ФД, формируя задний фронт каждого импульса на выходе ФД.

На другой вход ФД поступает последовательность высокостабильных опорных импульсов, формируя передний фронт каждого импульса на выходе ФД.

Так как дисперсию длительности импульсов на выходе ФД определяет только последовательность импульсов, поступающая на вход ФД со стороны СГ, на выходе ФД имеем последовательность независимых прямоугольных импульсов постоянной амплитуды a с детерминированным тактовым интервалом

$$T = \frac{2\pi K_1}{\omega_1}. \quad (12)$$

При этом моменты появления импульсов неизменны, а положение заднего фронта изменяется таким образом, что длительность импульсов представляет собой нормальную случайную величину со средним значением

$$\bar{\tau}_{\text{ФД}} = \frac{\pi K_1}{\omega_1} \quad (13)$$

(при скважности импульсов на выходе ФД $q = 2$) и дисперсией

$$\sigma_{\tau_{\text{ФД}}}^2 = \frac{\sigma^2}{\omega_1^2 (A_{m_2}^2 - C^2)} \left[1 + R \left(\frac{K_2}{2} \tau_0' \right) \right]. \quad (14)$$

Энергетический спектр этого случайного импульсного процесса имеет вид [4]

$$F(\omega) = \frac{2a^2}{\omega_1^2 T} \left[1 - e^{-\frac{\sigma^2}{\tau_{\text{ФД}}} \omega^2} + \frac{2\pi}{T} \left(1 - 2e^{-\frac{\sigma_{\tau_{\text{ФД}}}^2 \omega^2}{2}} \cos \omega \bar{\tau}_{\text{ФД}} + e^{-\frac{\sigma^2}{\tau_{\text{ФД}}} \omega^2} \right) \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta \left(\omega - \frac{2\pi r}{T} \right) \right]. \quad (15)$$

Полагая ФНЧ идеальным и с полосой прозрачности $0 - \Omega$, получим эффективное значение шумовой компоненты в управляющем напряжении:

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{\int_0^{\Omega} F(\omega) d\omega} = a_{\text{ФД}} \sqrt{\frac{2\Omega \sigma_{\tau_{\text{ФД}}}^2}{T}} \quad (16)$$

при

$$\sigma_{\tau_{\text{ФД}}}^2 \ll \frac{1}{\Omega^2}.$$

Подставляя в (16) значение $\sigma_{\tau_{\text{ФД}}}^2$ из (14) и учитывая, что

$$\tau_0' = \frac{2\pi}{\omega_2}, \quad (17)$$

после несложных преобразований запишем (16) в окончательном виде

$$U_{\text{ш}} = \frac{a\sigma}{\omega_2} \sqrt{\frac{2\Omega\omega_1 \left[1 + R \left(\frac{K_2\pi}{\omega_2} \right) \right]}{\pi K_1 (A_{m_2}^2 - C^2)}}. \quad (18)$$

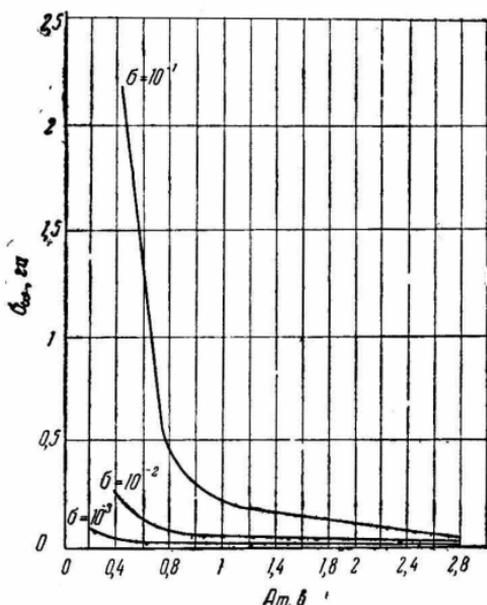


Рис. 3.

При больших значениях K_2 и учете (10) уравнение (18) примет вид

$$U_{\text{ш}} = \frac{a\sigma}{\omega_2} \sqrt{\frac{2\Omega\omega_1}{\pi K_1 (A_{m_2}^2 - C^2)}}. \quad (19)$$

Используя (19), среднеквадратичное значение отклонения частоты СГ при действии шумов

$$\sigma_{\omega_2} = S U_{\text{ш}} = \frac{S a \sigma}{\omega_2} \sqrt{\frac{2\Omega\omega_1}{\pi K_1 (A_{m_2}^2 - C^2)}}, \quad (20)$$

где S — крутизна электронной перестройки СГ. Следует отметить, что (20) справедливо лишь при безынерционном отклике частоты СГ на управляющее напряжение.

На рис. 3 показана зависимость σ_{ω_2} от A_{m_2} для одного из вариантов синтезатора. На рис. 4 приведены гистограммы, служащие статистическим аналогом плотности вероятности частоты синхронизируемого генератора, полученные в результате исследования воздействия шумов на входе ФУ этого синтезатора.

Значения среднеквадратичных отклонений частот синхронизируемого генератора, полученные в результате эксперимента, удовлетворительно согласуются с теоретическими результатами,

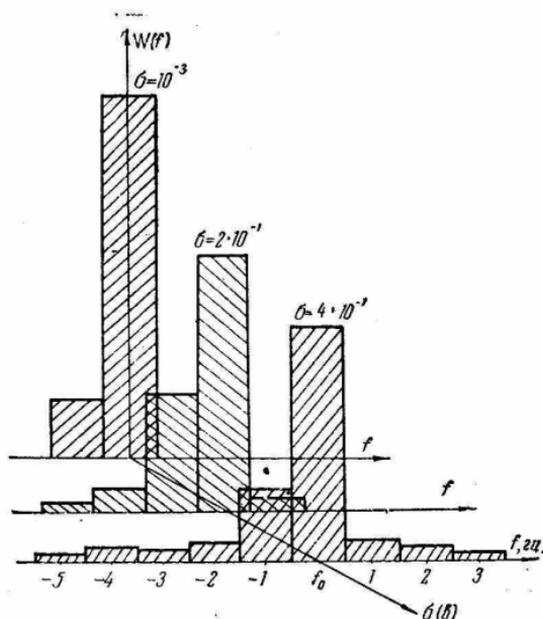


Рис. 4.

полученными по формуле (20), в частности, для случая $\sigma = 4 \cdot 10^{-1}$ (σ); при надежности результата серии измерений $\alpha = 0,99$ экспериментальное значение σ_{ω_s} лежит в пределах

$$1,58 \text{ гц} \leq \sigma_{\omega_s} \leq 2,7 \text{ гц},$$

а среднеквадратичное отклонение частоты синхронизируемого генератора, определенное по формуле (20), при условиях, соответствующих эксперименту:

$$\sigma_{\omega_s} \cong 2,9 \text{ гц}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. О. И. Губернаторов, В. Т. Пивовар. К выбору и расчету некоторых параметров цифровых синтезаторов частот. «Изв. вузов, Радиотехника», XII, № 5, 1969.
2. Ж. Перестон, Р. Гарднер. Влияние шума на генераторы пусковых импульсов. «Вопросы радиолокационной техники», № 4, 1954.
3. В. И. Тихонов. Выбросы случайных процессов. Изд-во «Наука», 1970.
4. Б. Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники. Изд-во «Советское радио», 1969.