

О ДЕЙСТВИИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОМЕХИ НА СИСТЕМУ ЦИФРОВОГО ЧАСТОТНОГО СИНТЕЗА

А. Н. Зеленин, Л. А. Дышук, Л. К. Шестак

Харьков

Помехозащищенность систем ФАПЧ рассматривается в ряде работ отечественных и зарубежных авторов. Это объясняется тем, что использование метода фазовой автоподстройки частоты широко применяется в системах синхронизации группы пространственно разнесенных автогенераторов [3] для обнаружения угловой ошибки в системах слежения за космическими объектами [4], для создания коммерческих и измерительных синтезаторов частот [5], где точностные характеристики системы ФАПЧ являются определяющими для точностных характеристик системы в целом. Системы с использованием метода цифрового частотного синтеза (ЦЧС) в последнее время все шире применяются благодаря возможности широкого использования элементов и узлов дискретной техники в интегральном и микромодульном исполнении. В работе [1] рассматривалось воздействие нормального шума на систему ЧЧС. В данной работе исследуется действие периодической помехи на систему ЦЧС.

Рассмотрим прохождение гармонического сигнала, пораженного аддитивной периодической помехой, через триггерный делитель частоты, наиболее часто применяющийся в качестве делителя частоты следования импульса в схеме ЧЧС. Типовая блок-схема цифрового синтезатора частоты показана на рис. 1, где СГ — синхронизируемый генератор, ОГ — опорный генератор, ФУ — формирующие импульсные устройства, Д — делители частоты

триггерного типа, ФД — фазовый детектор, ФНЧ — фильтр нижних частот, УЭ — управляющий элемент СГ.

В работе [2] исследовалась защищенность сигнала на выходе триггерного делителя частоты от продуктов паразитной модуляции при воздействии на входе делителя полезного сигнала

$$U_c = U_{mc} \sin \omega_c t$$

и помехи

$$U_n = U_{mn} \sin \omega_n t.$$

Делитель частоты состоял из формирующего устройства (ФУ — триггер Шмитта) и собственно триггеров, соединенных каскадно. Порог срабатывания формирующего устройства С был взят равным нулю для исключения влияния паразитной амплитудной модуляции (АМ) запускающего сигнала на входе ФУ.

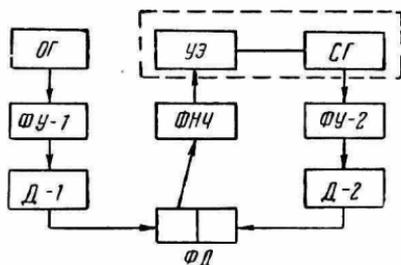


Рис. 1.

Согласно [2], спектр сигнала на выходе триггерного делителя частоты при отсутствии помехи ($U_n = 0$) запишется так:

$$\varphi_j(\omega t) = \frac{4U_j}{\pi} \sum_{n=1, 3, 5, 7, \dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\omega_c t}{K}, \quad (1)$$

где U_j — напряжение на выходе j -го триггера.

При воздействии на входе ФУ полезного сигнала и помехи, полагая $U_{mc} \gg U_{mn}$, запускающий сигнал можно представить как одно колебание, модулированное по амплитуде и фазе:

$$U_c + U_n = U_{mc} (1 + m \cos \Omega t) \sin (\omega_c t + m \sin \Omega t), \quad (2)$$

где

$$m = \frac{U_{mn}}{U_{mc}}, \quad \Omega = \omega_c - \omega_n.$$

Спектральный состав сигнала на выходе j -го триггера делителя частоты

$$\begin{aligned} \varphi_j(\omega_c t, \Omega t) = & \frac{4U_j}{\pi} \sum_{n=1, 3, 5, 7, \dots}^{\infty} \frac{1}{n} \left\{ I_0 \left(\frac{nm}{K} \right) \sin \frac{n\omega_c}{K} t + \right. \\ & + \sum_{q=1}^{\infty} I_q \left(\frac{nm}{K} \right) \sin \left(\frac{n\omega_c}{K} + q\Omega \right) t + \\ & \left. + \sum_{q=1}^{\infty} (-1)^q I_q \left(\frac{nm}{K} \right) \sin \left(\frac{n\omega_c}{K} - q\Omega \right) t \right\}, \quad (3) \end{aligned}$$

где I_q — функция Бесселя первого рода порядка q .

Положив в (3) $\omega_c = l\omega_n$ и (при $m \ll 1$)

$$I_0\left(\frac{m}{K}\right) = 1, \quad I_q\left(\frac{m}{K}\right) = \frac{1}{q!} \left(\frac{m}{2K}\right)^q,$$

а также ограничив рассмотрение случаем $q = 1$, поскольку составляющими порядка $q = 2$ и выше можно пренебречь ввиду их малости [2], получим, что при $K = 2l$ выражения (3) и (1) совершенно идентичны, т. е. на выходе триггерного делителя частоты с коэффициентом деления $K = 2l$ паразитное действие гармонической помехи с частотой $\omega_n = \frac{\omega_c}{l}$ сведено до очень малых величин.

В реальных системах ЦЧС порог срабатывания ФУ чаще всего отличен от нуля ($C > 0$) и в этом случае необходимо учитывать паразитное влияние АМ на параметры выходного сигнала триггерного делителя частоты. Действие паразитной АМ на систему ЦЧС обусловлено тем, что время возникновения переднего фронта у каждого импульса на выходе ФУ (t_i) с точностью до постоянной времени срабатывания ФУ (τ_0) совпадает с моментом (t_{cn}) пересечения запускающим сигналом уровня C :

$$t_i = t_{cn} + \tau_0. \quad (4)$$

Момент времени t_{cn} зависит от фазы и крутизны запускающего сигнала. Для гармонического сигнала крутизна запускающего фронта α в случае постоянства периода запускающего колебания T_0 связана с амплитудой сигнала A следующей очевидной зависимостью:

$$\alpha \approx \arctg \frac{4A}{T_0}. \quad (5)$$

Длительность импульса на выходе ФУ связана с соотношением амплитуды сигнала к порогу срабатывания следующим соотношением, полученным в результате аппроксимации графической зависимости:

$$\tau_u = \frac{T_0}{2} \left\{ 1 - 1,018 \left(\frac{A(t)}{C} \right)^{-0,98} \exp \left[-0,007 \left(\frac{A(t)}{C} \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

где

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_c}.$$

Предположим, что $A(t)$ — периодическая функция с периодом

$$T_n = lT_0. \quad (7)$$

Длительность импульсов на выходе триггерного делителя частоты при отсутствии паразитной АМ может быть определена так:

$$\tau_{uK} \Big|_{U_{mn}=0} = \frac{\pi}{\omega_c} K, \quad (8)$$

где

$$K = 2l, \quad j = 1, 2, 3, 4, \dots$$

При паразитной АМ запускающего сигнала на входе ФУ длительность импульсов на выходе триггерного делителя частоты

$$\tau_{uK} = \frac{\pi K}{\omega_c} + \left[\frac{\tau_u}{2} (t_i) - \frac{\tau_u}{2} \left(t_i + \frac{\pi K}{\omega_c} \right) \right] \quad (9)$$

или в развернутой форме при использовании соотношения (6)

$$\tau_{uK} = \frac{\pi K}{\omega_c} + \frac{0,509\pi}{\omega_c} \left\{ \left[\frac{A \left(t_i + \frac{\pi K}{\omega_c} \right)}{C} \right]^{-0,98} \times \right. \\ \left. \times \exp(-0,007) \frac{A \left(t_i + \frac{\pi K}{\omega_c} \right)}{C} - \left[\frac{A(t_i)}{C} \right]^{-0,98} \exp(-0,007) \frac{A(t_i)}{C} \right\} \quad (10)$$

Учитывая (7), т. е. $A(t_i) = A(t_i + T_n)$, из (10) при $K = 2l$ получим $\tau_{uK} \Big|_{U_{mn}=0} = \tau_{uK}$.

Таким образом, соотношения, полученные выше, остаются справедливыми и для случая прохождения через триггерный делитель частоты сигнала, амплитуда которого подвержена паразитной модуляции периодической помехой.

Экспериментально проверяя прохождение гармонического сигнала, подверженного воздействию периодической помехи через триггерный делитель частоты, на вход ФУ подавали полезный сигнал

$$U_{mc} = 3в, \quad f_c = 10 \text{ кГц, (т. е. } l = 4)$$

и помеху

$$U_{mn} = 1,4 \text{ в, } f_n = 2,5 \text{ кГц.}$$

На рис. 2 приведены осциллограммы прохождения гармонического сигнала, пораженного аддитивной периодической помехой a , и гармонического сигнала без помехи a_1 через триггерный делитель частоты. На рис. 2, б, в, г и д показаны соответственно спектры сигналов на выходе ФУ, делителя частоты на 2, делителя частоты на 4 и делителя частоты на 8 при воздействии на входе ФУ полезного сигнала и помехи; справа на рис. 2, б₁, в₁, г₁ и д₁ показаны спектры сигналов на выходе аналогичных делителей при $U_n = 0$.

Из рис. 2 видно, что при $K = 8$ спектры сигналов на выходе делителя частоты в случае запускающего сигнала, пораженного периодической помехой и без нее — идентичны, что подтверждает теоретические результаты.

Оценим влияние периодической помехи на систему ЦЧС. Вначале рассмотрим случай воздействия периодической помехи на систему ЦЧС, считая точкой приложения помехи вход ФУ [1]. В этом случае на основании (3) и (10) при $K = 2l$ нет паразитной

модуляции последовательности импульсов на входе ФД со стороны синхронизируемого генератора (СГ), следовательно, нет паразитных компонент в управляющем напряжении на выходе ФНЧ. Таким образом, система ЦЧС для периодической помехи, приложенной ко входу ФУ ($K = 2l$), представляет собой режекторный фильтр

При действии периодической помехи на управляющий элемент (УЭ) синхронизируемого генератора ($K = 2l$) отсутствует информация о помехе в сигнале на входе фазового детектора. Следовательно, в сигнале на выходе ФНЧ не присутствует управляющая компонента для компенсации паразитной модуляции сигнала СГ. В этом случае система ЦЧС не оказывает фильтрующего действия на сигнал СГ и представляет собой по отношению к периодической помехе (при $K = 2l$) полосовой фильтр.

В процессе исследования схем ЦЧС было отмечено, что по отношению к помехам, действующим на УЭ и непосредственно на СГ (внутренние помехи), система ЦЧС представляет собой фильтр верхних частот (ФВЧ), а для помех, воздействующих на остальные блоки ЦЧС (внешние помехи), — фильтр нижних частот (ФНЧ).

Все сказанное выше может быть проиллюстрировано с помощью следующих рассуждений: положим, что в отсутствие помехи в системе синхронизации СГ методом ЦЧС наблюдался устойчивый режим синхронизма. При действии внешней помехи с частотой $\omega_n < \Omega_\phi$, где Ω_ϕ — частота среза ФНЧ, в управляющем сигнале на выходе ФНЧ будет присутствовать значительный паразитный продукт, определяемый помехой; следовательно, и уровень паразитных компонент в выходном колебании СГ будет велик. При $\omega_n > \Omega_\phi$ меньшая доля паразитных компонент — в управляющем сигнале и соответственно в выходном колебании СГ. В случае $\omega_n \gg \Omega_\phi$ доля паразитных компонент в управляющем напряжении и в выходном сигнале СГ очень мала. Таким образом, по отношению к внешней помехе система ЦЧС представляет собой ФНЧ.

Рассмотрим теперь влияние системы ЦЧС на внутреннюю помеху. Предположим, что помеха с частотой $\omega_n < \Omega_\phi$ приложена к УЭ синхронизируемого генератора. При авторегулировании на выходе ФНЧ появится управляющий сигнал, стремящийся компенсировать действие помехи. С увеличением ω_n все меньшая доля компенсирующих действие помехи компонент в управляющем напряжении, т. е. меньшее фильтрующее действие системы ЦЧС. При $\omega_n \gg \Omega_\phi$ фильтрующее действие ЦЧС стремится к нулю, и доля паразитного продукта Q в выходном колебании СГ велика. Следовательно, по отношению к внутренней помехе система ЦЧС представляет собой ФВЧ. Учитывая, что кратковременная нестабильность частоты СГ в системе ЦЧС определяется собственной нестабильностью СГ в свободном (без кольца ФАПЧ) состоянии, для получения высокой кратковременной стабильности частоты СГ необходимо расширять полосу прозрачности ФНЧ (так как собственные шумы СГ, определяющие его кратковременную частот-

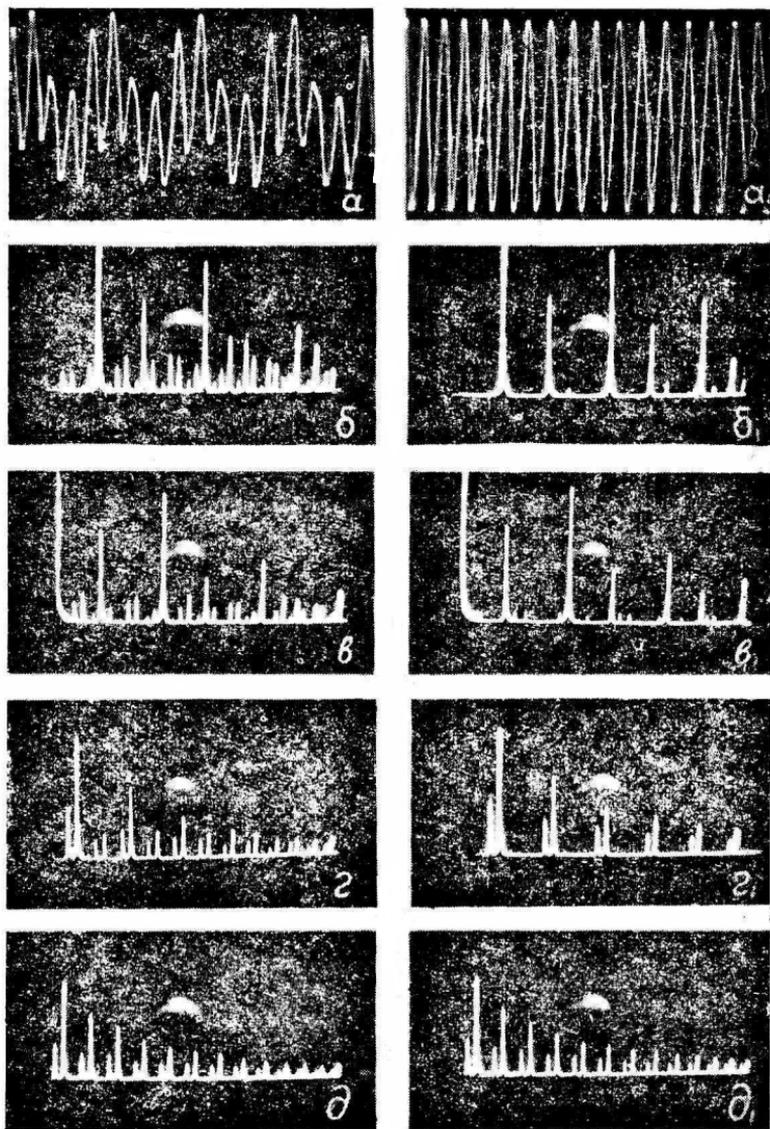


Рис. 2.

ную нестабильность, являются по отношению к системе ЦЧС внутренними).

На основании результатов и расчетных соотношений, полученных в данной работе и работе [1], можно оценить влияние внутренних и внешних помех на рабочий сигнал синхронизируемого генератора в системе ЦЧС.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. И. Губернаторов, А. Н. Зеленин, Е. Л. Демьянкова. О действии помех на синхронизируемый генератор в системе цифрового частотного синтеза. Сб. «Радиотехника», вып. 21. Изд-во ХГУ, Харьков, 1972.

2. Е. М. Ряхин. Влияние синусоидальной помехи на триггерный делитель частоты. «Вопросы радиоэлектроники, серия «Техника проводной связи», вып. 1, 1970.

3. W. Kaminski and H. A. Schneider. Multiphase Transmitter Synchronization IEEE Trans on Circuits and Systems (Oct 1968).

4. M. S. Thompson, J. R. Lockett et al. Phase Stabilization of Widely Separated Oscillators. IEEE Trans on Antennas and Propagation (Nov. 1968).

5. В. А. Левин. Стабилизация дискретного множества частот. Изд-во «Энергия», 1970