

В. П. ШИНКАРЕНКО, канд. техн. наук, В. А. РОВИЦКИЙ

### ИССЛЕДОВАНИЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТЫ

Цифровые синтезаторы на основе фазовой автоподстройки частоты с делителем в цепи обратной связи применяются в радиотехнических системах [1]. Одной из важнейших характеристик синтезаторов является кратковременная нестабильность частоты (КНЧ) выходного колебания.

В работе исследуется КНЧ цифровых синтезаторов и приводится ее сравнение с КНЧ синтезаторов на основе умножения частоты. Под нестабильностью частоты колебания понимается изменение оценки частоты  $\omega(t)$  во времени. Количественные значения нестабильности частоты характеризуют степень этого изменения. КНЧ оценивается обычно за время  $[50/f_0 - (1-100)]c$ , где  $f_0$  — частота выходного колебания.

Этот диапазон значений интервала КНЧ выбран исходя из предположения, что определяющее влияние на КНЧ оказывают относительно «быстрые» флуктуации, вызванные тепловыми и дробовыми шумами элементов схем. В этой связи реализации колебаний можно считать реализациями стационарного в широком смысле случайного процесса [2]. При этом наиболее употребительной мерой абсолютной КНЧ является среднеквадратичное отклонение оценки  $\omega(t)$ , т. е.

$$\sigma_{\omega} = \sqrt{D\{\omega(t)\}} = \sqrt{\langle [\omega(t) - \langle \omega(t) \rangle]^2 \rangle}.$$

Относительная КНЧ определяется так:

$$\frac{\sigma_{\omega}}{\omega_0} = \frac{V D\{\overline{\omega(t)}\}}{\omega_0},$$

где

$$\omega_0 = \langle \overline{\omega(t)} \rangle.$$

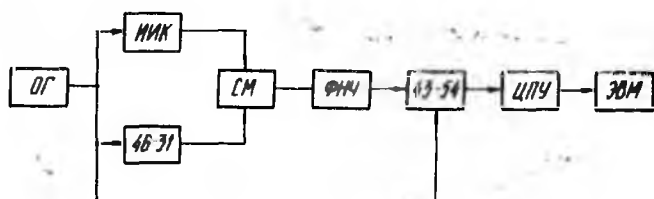
Методы измерения КНЧ можно разделить на спектральные и временные [2]. Спектральный основан на измерении спектральных плотностей мощностей фазовых  $S_{\varphi}(\Omega)$  или частотных  $S_f(\Omega)$  флюктуаций с помощью фазовых или частотных детекторов. Относительная кратковременная нестабильность частоты рассчитывается по формулам [3]

$$\frac{\sigma_f}{f_0} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S_f(\Omega) \left( \frac{\sin \frac{\Omega t}{2}}{\frac{\Omega t}{2}} \right)^2 d\Omega}; \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_f}{f_0} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} S_{\varphi}(\Omega) [1 - \cos \Omega t] d\Omega}. \quad (2)$$

Временной — предполагает использование электронно-счетного частотомера (ЭСЧ), работающего, как правило, в режиме измерения периода [2]. Время наблюдения выбирается так, чтобы исключить долговременные отклонения частоты. Обычно  $T_n \ll 100$  с, время усреднения  $\tau$  равно 0,001; 0,01; 0,1; 1,10 с. В данном случае применен второй метод, позволяющий автоматизировать процесс измерения, регистрации и вычислений.

Структурная схема измерительной установки представлена на рисунке.



Здесь приняты обозначения: ОГ — опорный генератор; ЧБ-31 — синтезатор частоты, ИИК — исследуемый источник колебаний; СМ — смеситель; ФНЧ — фильтр нижних частот; ЧЗ-54 — электронно-счетный частотомер; ЦПУ — цифрочитающее устройство; ЭВМ — электронно-вычислительная машина.

В качестве ОГ использовался стандарт частоты Ч1-69 и высокостабильный кварцевый генератор. ИИК — это в первом случае — цифровой синтезатор частоты, во втором — умножитель частоты.

На входы смесителя поступают два колебания с различными частотами. Период разностной частоты определяет минимальное время усреднения и в указанном случае равен  $T_p = 1$  мс. Большее время усреднения можно получить увеличением коэффициента деления делителя ЭСЧ (переключатель «множитель периода»). Таким образом, установка позволяет производить измерение КНЧ при времени усреднения от 1 мс до 10 с.

Параметры и характеристики исследуемого цифрового синтезатора частоты (ЦСЧ) следующие. Частота сравнения составляет 1 МГц, коэффициент деления делителя в цепи обратной связи  $K_{дч} = 40 \dots 50$ , крутизна управления генератора  $S_{уг} = 3,14 \times 10^6$  рад/В·с, крутизна фазового детектора  $K_{фд} = 10/6,28$  В/рад.

При проектировании и изготовлении узлов ЦСЧ принимались необходимые меры для уменьшения паразитных наводок и влияния импульсных помех на высокочастотные цепи управляемого генератора. Смеситель выполнен на интегральной микросхеме 526ПС1. ФНЧ имеет частоту среза 1,2 кГц и затухание на частоте 2 кГц составляет 60 дБ. Количество отсчетов при измерении КНЧ  $N$  выбиралось от нескольких десятков до ста. Относительная КНЧ определяется по формуле [1]

$$\frac{\sigma_f}{f_0} = \frac{F_p^2}{f_0} \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{N-1} \frac{(T_{k+1} - T_k)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

Здесь  $T_1, T_2, \dots, T_k$  — фиксируемые ЭСЧ значения периода разностной частоты.

Обработка результатов измерений проводилась и с использованием стандартного отклонения

$$\frac{\sigma_f}{f_0} = \frac{F_p^2}{f_0} \sqrt{\Delta T^2} = \frac{F_p^2}{f_0} \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где  $\bar{T}$  — среднее значение периода  $\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$ .

Если количество отсчетов  $N$  превышало  $N \geq 20$ , значение вариаций Аллена с большой степенью точности совпадало с КНЧ, рассчитываемой по соотношению (4).

Разрешающая способность системы при измерении КНЧ определяется нестабильностью частоты, вносимой синтезатором Ч6-31. С целью ее измерения в канал ИИК включен второй синтезатор Ч6-31. Двухканальный метод обеспечивает компенсацию шумов опорного генератора и позволяет получить КНЧ собственно синтезатора Ч6-31, если считать их идентичными в обоих каналах.

Результаты проверки разрешающей способности измерений совпадают с данными, приведенными в работе [2]:

$$\left. \frac{\sigma_f}{f} \right|_{\tau=1\text{мс}} = 10^{-8}; \quad \left. \frac{\sigma_f}{f} \right|_{\tau=10\text{мс}} = 10^{-9}; \quad \left. \frac{\sigma_f}{f} \right|_{\tau=100\text{мс}} = 10^{-10}$$

В таблице приведены рассчитанные по формуле (3) значения КНЧ ЦСЧ (1), (2) и множителя частоты (3).

Номер эксперимента	$\tau, \text{с}$				
	0,001	0,01	0,1	1,0	10,0
1	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$
2	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$	$4,8 \cdot 10^{-10}$	$9,0 \cdot 10^{-11}$	$9,0 \cdot 10^{-12}$
3	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-11}$

В экспериментах 1, 3 в качестве ОГ был применен кварцевый генератор, в случае 2 — стандарт частоты Ч1-69.

Сравнение результатов 1, 3 позволяет сделать вывод, согласно которому КНЧ цифрового синтезатора частоты несколько меньше, чем аналогового множителя, что и подтверждается в работе [4].

Уменьшение КНЧ при изменении  $\tau$  от 1 до 10 мс в экспериментах 1, 3 объясняется наличием минимума фазовых шумов в условиях  $\tau=0,01$  с у кварцевого генератора, используемого в качестве опорного. Применение стандарта частоты Ч1-69 привело к уменьшению КНЧ почти на порядок при  $\tau \geq 10$  мс, в случае же  $\tau=1$  мс уменьшение незначительно. Это обусловлено в основном разрешающей способностью при  $\tau=1$  мс, значение которой порядка  $10^{-8}$ . Относительная КНЧ стандарта частоты Ч1-69 за 10 с равна  $3,2 \cdot 10^{-12}$ , умеренные значения КНЧ ЦСЧ достигает за 10 с  $9 \cdot 10^{-12}$ , т. е. нестабильность увеличивается в три раза. По мере увеличения времени усреднения нестабильность частоты ЦСЧ все меньше отличается от нестабильности опорного генератора и при  $\tau \geq 100$  с они примерно равны.

Полученные данные позволяют правильно определить требования к КНЧ в зависимости от метода синтеза и времени усреднения.

**Список литературы:** 1. Манассевич В. Синтезаторы частот (теория и проектирование)/Пер. с англ.; Под ред. А. С. Галина. М., 1979. 384 с. 2. Аппаратура для частотных и временных измерений/В. А. Благоев, А. С. Домбровский, В. Н. Зайцев и др. М., 1971. 336 с. 3. Альтшуллер Г. Б. Кварцевая стабилизация частоты. М., 1974. 272 с. 4. Верещагин Е. М., Волошин А. П., Никитенко Ю. Г. Транзисторно-варакторные генераторы. К., 1979. 174 с.

Поступила в редколлегию 16.01.87