

УДК 621.376.43

В.В. Печенин, К.А. Щербина, М.А. Вонсович, Ю.В. Съедина

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

## ОЦЕНКА ФЛУКТУАЦИОННЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ, РЕАЛИЗОВАННОЙ НА СИНХРОНИЗИРОВАННОМ АВТОГЕНЕРАТОРЕ

*Получены аналитические выражения для количественных оценок дисперсии фазовых и частотных флуктуаций при воздействии аддитивной смеси гармонического сигнала и нормальной помехи в ограниченной полосе частот, на синхронизированный автогенератор, функционирующий в режиме следящей системы. В основу теоретических расчетов положен метод замещения источника естественного шума автогенератора, входными шумами в ограниченной полосе. Приведены примеры расчета величин дисперсий оценок частоты и фазы по данным, близким к реальным для доплеровских измерителей скорости самолета.*

**Ключевые слова:** следящая система, флуктуации, автогенератор, частота, фаза.

### Введение

При оценке качества работы следящих систем (измерителей) обычно используют ряд наиболее важных показателей [1, 2] к числу которых относится флуктуационная погрешность или помехоустойчивость слежения [3].

Количественной мерой оценки флуктуационной погрешности следящей системы в установленном режиме является суммарная дисперсия сигнальной и шумовой погрешностей. Соответствующие расчетные соотношения приведены, например, в [4]. При этом речь идет о следящей системе автоматического регулирования, содержащей в явном виде измерительное устройство, цепи управления и усиления (коррекции) и объект управления. К таким

системам можно отнести системы частотной (ЧАП), фазовой (ФАПЧ) и другие [5].

Отличительной особенностью следящих систем реализованных на синхронизированном генераторе [6,7] является отсутствие в явном виде измерительного устройства (частотного или фазового детекторов) и цепей управления (фильтра низкой частоты), а процесс слежения осуществляется путем принудительной перестройки частоты синхронизированного автогенератора. Эта особенность такой следящей системы приводит к тому, что получение расчетных соотношений соответствующих дисперсий оценок (частоты, фазы) по методике, изложенной в [4], оказывается затруднительной.

**Цель статьи** заключается в обосновании методики количественного оценивания и получении рас-

четных соотношений для вычисления показателей погрешностей – дисперсий оценок частоты и фазы следящей системы, реализованной на синхронизированном автогенераторе, при воздействии на его входе ограниченной по частотной полосе аддитивной смеси гармонического сигнала и нормальной помехи.

### Изложение основного материала

Предполагаем, что следящая схема на синхронизированном автогенераторе находится в режиме «захвата» частоты входного гармонического сигнала без шумов. В этом случае основным источником шума будет естественный шум автогенератора. В такой ситуации, как показано в [6], дисперсия фазовых флуктуаций будет равна

$$\sigma_{\varphi}^2 = \frac{\pi\omega_0 N_0}{E_0 E_{\Gamma}} \left[ \sqrt{1 - (\Delta/\Delta_0)^2} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $\omega_0$  – частота входного сигнала,  $E_0$  – амплитуда входного сигнала,  $E_{\Gamma}$  – амплитуда входного сигнала автогенератора,  $\Delta_0$  – полоса синхронизации (критическая расстройка),  $\Delta$  – расстройка частоты входного сигнала, относительно частоты колебаний автогенератора  $\Delta = (\omega_0 - \omega_{\Gamma}) < \Delta_0$ ,  $N_0$  – спектральная плотность мощности естественного шума автогенератора. Там же в [6] получено выражение для дисперсии флуктуаций частоты

$$\sigma_{\omega}^2 = \left( \pi\omega_0^2 N_0 / E_{\Gamma}^2 \right) \times \left[ 1 - \sqrt{1 - (\Delta/\Delta_0)^2} \arctg \frac{1}{1 - (\Delta/\Delta_0)^2} \right]. \quad (2)$$

В режиме синхронизации  $\Delta \ll \Delta_0$ ,  $E_{\Gamma} \ll E_0$ ,  $N_0 \Delta_0 \ll 1$ . Воспользуемся формулами (1), (2) при следующих исходных условиях.

На вход следящей схемы поступает синхронизирующий сигнал в полосе  $\Delta_{\Pi} \gg \Delta_0$  при  $\Delta_{\Pi} \ll f_0$ , где  $f_0$  – центральная частота полосы синхронизирующего сигнала. В режиме синхронизации с принудительной перестройкой частоты автогенератора  $\Delta = (\omega_0 - \omega_{\Gamma}) \ll \Delta_H$ , где  $\Delta_H$  – начальная расстройка частоты входного сигнала  $\Delta_H \in \Delta_{\Pi}$ .

Вместе с выходным сигналом имеет место аддитивный нормальный шум со спектральной плотностью мощности  $N_{\text{ОП}} \gg N_0$ , т.е. много больше естественного шума синхронизированного генератора. Необходимо получить расчетные соотношения для  $\sigma_{\varphi\Pi}^2$ ,  $\sigma_{\omega\Pi}^2$  и  $\Delta$ . Для получения  $\sigma_{\varphi\Pi}^2$  воспользуемся выражением (1) умножив и разделив числитель и знаменатель соответственно на  $E_0$  и  $\Delta_{\Pi}$ . Тогда

$$\sigma_{\varphi\Pi}^2 = \pi\omega_0 N_{\text{ОП}} E_0 \Delta_{\Pi} / \left( E_{\Gamma} E_0^2 \Delta_{\Pi} \right). \quad (3)$$

Обозначим в (3)  $N_{\text{ОП}} \cdot \Delta_{\Pi} = P_{\text{Ш}}$  – мощность входного шума по каналу синхронизации,  $q^2 = E_0^2 / P_{\text{Ш}}$  – отношение сигнал/шум по мощности,  $E_{\Gamma} / E_0 = k_y$ , что эквивалентно коэффициенту усиления. Учитывая, что  $\pi, \omega_0, k_y, \Delta_{\Pi}$  – величины фиксированные, перепишем формулу 3 таким образом

$$\sigma_{\varphi\Pi}^2 = M \left( 1/q^2 \right), \text{ где } M = \frac{\pi\omega_0}{k_y \Delta_{\Pi}} \text{ (рад}^2\text{)}. \quad (4)$$

При  $M = 1$  дисперсия  $\sigma_{\varphi\Pi}^2 = \sigma_{\varphi_0}^2$ , где  $\sigma_{\varphi_0}^2$  – дисперсия флуктуаций фазы фильтрованного сигнала системой ФАПЧ первого порядка [8].

Для количественного примера оценим величину коэффициента  $M$  при следующих исходных данных:  $q^2 \gg 1$ ,  $f_0 = 500$  кГц ( $\omega_0 = 6,28 \cdot 5 \cdot 10^5$  рад)  $k_y = 10^3$  ( $E_0 = 1\text{МВ}$ ,  $E_{\Gamma} = 1\text{В}$ ),  $\Delta_{\Pi} = 10$  кГц (полоса доплеровских частот самолетного измерителя скорости самолета). Тогда  $M \approx 1$ , что дает  $\sigma_{\varphi\Pi}^2 = \sigma_{\varphi_0}^2$ . При вариациях параметров, входящих в коэффициент  $M$  можно получить результат по дисперсии  $\sigma_{\varphi\Pi}^2 < \sigma_{\varphi_0}^2$  т.е. следящая система на синхронизированном автогенераторе с принудительной перестройкой частоты может быть лучше по сравнению с ФАПЧ 1-го порядка (так и худшей).

Получим расчетную формулу для  $G_{\omega\Pi}^2$ , используя выражение (2) с учетом оговоренных выше условий при получении соотношения (3) и подстановкой в числитель знаменателя  $E_0^2$  и  $\Delta_{\Pi}$ . Тогда

$$G_{\omega\Pi}^2 \cong \omega_0^2 N_{\text{ОП}} E_0^2 \Delta_{\Pi} / \left( E_{\Gamma}^2 E_0^2 \right) \times \left[ 1 - \frac{\pi}{4} \right] \cong \frac{\omega_0 E_0^2}{E_{\Gamma}^2} \left[ 1 - \frac{\pi}{4} \right] \cdot \frac{1}{q^2} = N \left( \frac{1}{q^2} \right), \quad (5)$$

где  $N = \left( \omega_0^2 / k_y^2 \right) \cdot [1 - \pi/4]$  (Гц<sup>2</sup>).

Проанализируем возможности минимизации дисперсии флуктуаций частоты, положив  $N = 1$ . Тогда необходимо выполнить условие  $\omega_0^2 / k_y^2 \leq 1,273$  т.е.  $\omega_0^2 \cong 1,273 \cdot k_y^2$ . Например:  $f_0 = 50$  кГц,  $\Delta_{\Pi} = 10$  кГц,  $k_y = 10^4$  даёт:  $k_y \cong 10^5$ , т.е.  $k_y$  на два порядка больше при снижении  $f_0$  в два раза, чтобы получить  $N = M = 1$ .

Обычно на практике такой случай не имеет места, тем не менее следящая система, реализованная на синхронизированном автогенераторе с принудительной перестройкой позволяет реализовать оба варианта слежения с минимизацией флуктуационной погрешности либо по частоте, либо по фазе.

Для оценки величины  $\Delta = \Delta_{\text{ОСТ}}$ , называемой остаточной средней расстройкой можно воспользоваться расчетной формулой, приведенной в [7] с учетом оговоренных выше условий

$$\Delta = \Delta_{\text{ОСТ}} = 1 / \left( \sqrt{2\pi} \cdot S \right) \times \left[ \int_{1+\Delta}^{\infty} \sqrt{\varepsilon^2 - 1} \cdot e^{-\varepsilon^2 / (2S^2)} d\varepsilon - \int_{1-\Delta}^{\infty} \sqrt{\varepsilon^2 - 1} \cdot e^{-\varepsilon^2 / S^2} d\varepsilon \right], \quad (6)$$

где  $\varepsilon = (\omega_0 / (2\Delta\pi)) \cdot \delta C_0'(t)$ ,  $\delta C_0'(t)$  – ошибка установки текущего значения емкости контура генератора  $C_0'(t)$ , которая является случайной величиной с заданным вероятностным распределением,

$$S^2 = \frac{\omega_0^2}{4(\Delta\pi)^2} \cdot \langle \delta C_0'(t) \rangle.$$

Реальная величина  $\Delta_{\text{ОСТ}}$  определяется зоной нечувствительности изменений емкости контура автогенератора к изменению управляющего напряжения по каналу принудительной перестройки частоты синхронизированного автогенератора. При этом можно считать, что  $\Delta_{\text{ОСТ}}$ , рассчитанная по (6), есть минимальное значение остаточной расстройкой.

## Заклучение

На основании выполненных в настоящей работе исследований можно констатировать следующее. Предложен метод оценки флуктуационных погрешностей следующей системы, реализованной на синхронизированном автогенераторе, суть которого состоит в замещении источника естественных шумов автогенератора, источником внешних шумов, поступающих вместе с синхронизирующим сигналом на вход автогенератора.

В результате такого замещения удалось преодолеть известные трудности получения расчетных выражений для оценки дисперсий частоты и фазы синхронизированного автогенератора.

## ОЦІНКА ФЛУКТУАЦІЙНИХ ПОХИБОК СТЕЖАЧОЇ СИСТЕМИ, РЕАЛІЗОВАНОЇ НА СИНХРОНІЗОВАНОМУ АВТОГЕНЕРАТОРІ

В.В. Печенін, К.О. Щербина, М.А. Вонсович, Ю.В. С'єдіна

*Отримано аналітичні вирази для кількісних оцінок дисперсії фазових і частотних флуктуацій при впливі адитивної суміші гармонійного сигналу і нормальної переходи в обмеженій смузі частот, на синхронізований автогенератор, що функціонує в режимі стежачої системи. В основу теоретичних розрахунків покладено метод заміщення джерела природного шуму автогенератора, вхідними шумами в обмеженій смузі. Наведено приклади розрахунку величин дисперсій оцінок частоти і фази за даними, близькими до реальних для доплерівських вимірників швидкості літака.*

**Ключові слова:** стежача система, флуктуації, автогенератор, частота, фаза.

## ASSESSMENT OF FLUCTUATION ERRORS OF TRACKING SYSTEM BASED ON SYNCHRONIZED SELF-OSCILLATOR

V.V. Pechenin, K.A. Scherbina, M.A. Vonsovich, J.V. Syedina

*Analytical expressions are calculated for the quantitative dispersion assessment of the phase- and frequency fluctuations during the exposure of an additive mixture of band-limited harmonic and interfering signals onto the synchronized self-oscillator operating as the tracking system. Theoretical calculations are based on the method of substitution of the natural noise source in self-oscillator by the band-limited input noises. Examples of calculation of the frequency and phase dispersion assessment according to near-real data for Doppler velocity systems are given.*

**Keywords:** tracking system, fluctuations, self-oscillator, frequency, phase.

Получены удобные и простые аналитические выражения для оценки флуктуационных погрешностей конкретной следящей системы. Приведены примеры расчета величин дисперсий оценок частоты и фазы по данным, близким к реальным для доплеровских измерителей скорости самолета.

## Список литературы

1. Фалькович, С.Е. Основы статистической теории радиотехнических систем. Учебное пособие для вузов [Текст] / С.Е. Фалькович, П.Ю. Костенко. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2005. – 390 с.
2. Фомин, А.Ф. Аналоговые и цифровые синхронно-фазовые измерители и демодуляторы [Текст] / А.А. Фомин, А.И. Хорошавин, О.И. Шелухин. – М.: Радио и связь, 1987. – 248 с.
3. Оценивание дальности и скорости радиолокационных системах [Текст] / В.И. Меркулов, А.И. Канащенков, А.И. Перов и др. – М.: Радиотехника, 2004. – 312 с.
4. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции [Текст] Пер. с англ./Под ред. В.И. Тихонова, В.Т. Горменова – М.: Сов. радио, 1975. – Т.2, 344 с.
5. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации [Текст] / В.В. Шахгильдян, А.А. Ляховкин, В.Л. Карякин и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 320 с.
6. Печенин, В.В. Синтез структурно-физической модели следящего фильтра с принудительной перестройкой частоты синхронизированного автогенератора [Текст] / В.В. Печенин, К.А. Щербина, О.В. Войтенко // Системи управління навігації та зв'язку: зб. наук. пр. – Вип. 3. – К.: ЦНДІ НІУ, 2012. – С. 94-98.
7. Анализ частотных характеристик активной селектирующей системы с автоматической подстройкой частоты синхронизированного автогенератора [Текст] / В.В. Печенин, К.А. Щербина, О.В. Войтенко, Е.П. Мсаллам // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – №2(61) 2013. – С 20-23.
8. Тузов, Г.И. Выделение и обработка информации в доплеровских системах [Текст] / Г.И. Тузов. – М.: Сов. радио, 1967. – 256 с.

Поступила в редколлегию 12.09.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.