

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 ω_0 – частота входного сигнала, E_0 – амплитуда входного сигнала, E_{Γ} – амплитуда входного сигнала автогенератора, Δ_0 – полоса синхронизации (критическая расстройка), Δ – 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 Δ_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 Δ . Для получения $\sigma_{\varphi\Pi}^2$ воспользуемся выражением (1) умножив и разделив числитель и знаменатель соответственно на E_0 и Δ_{Π} . 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 Δ_{Π} . 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 $N = \left(\omega_0^2 / k_y^2 \right) \cdot [1 - \pi/4]$ (Гц²).

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.