

УДК 621.396:681.33

В.В. ПЕЧЕНИН¹, К.А. ЩЕРБИНА¹, О.В. ВОЙТЕНКО², Е.П. МСАЛЛАМ¹

¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

² *Житомирский военный институт Национального авиационного университета «ЖВИ НАУ», Украина*

АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЙ СЕЛЕКТИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ СИНХРОНИЗИРОВАННОГО ГЕНЕРАТОРА

На основе выполненных исследований показано, что использование автоматической подстройки частоты синхронизированного генератора в активной селективирующей системе увеличивает полосу критической расстройки синхронизированного генератора до полосы пропускания предшествующего активной системе резонансного тракта, стабилизирует остаточную расстройку и ширину спектральной линии рассмотренной активной системы по сравнению с обычной одноходовой синхронизацией. При этом существенно упрощается схемная реализация активной селективирующей системы по сравнению с известными системами фазовой и частотной автоподстройки.

Ключевые слова: синтез, фильтр, частота, автогенератор, синхронизация, регулирование, точность, быстродействие, контур.

Введение

Современные тенденции дальнейшего развития и совершенствования аэрокосмических систем, повышение требований к безопасности полетов космических и воздушных летательных аппаратов (ЛА) предопределяют повышение требований к точностным характеристикам радиотехнических измерительных систем контроля параметров движения ЛА [1-3].

Значительное место в общей структуре радиотехнических средств обеспечения безопасности полетов ЛА занимают частотные и фазовые радиотехнические системы (РТС).

При разработке и практической реализации фильтрующих трактов частотных и фазовых РТС широко используются активные селективирующие системы (АСС), основным элементом которых являются схемы частотно-фазовой автоподстройки частоты типа фазовой автоподстройки (ФАП), частотной автоподстройки (ЧАП) и частотно-фазовой автоподстройки (ЧФАП).

Несмотря на достигнутые результаты в области совершенствования существующих АСС, задача улучшения их технических характеристик остается актуальной.

Ряд вопросов, связанных с улучшением динамической точности и быстродействия систем ФАП и ЧАП рассмотрен в работах [4, 5]. Однако задача анализа частотных характеристик АСС, построенных на основе использования синхронизированного генератора с автоматической подстройкой частоты внешним управляющим сигналом, решена лишь частично.

Цель работы

Проанализировать на теоретическом уровне частотные свойства и характеристики активной селективирующей системы, реализованной на синхронизированном автогенераторе с внешней автоподстройкой частоты.

Содержание выполненных исследований

Теоретические основы внешней синхронизации автогенератора гармоническим и квазигармоническим входными сигналами достаточно подробно изложены в [6].

С позиций целевой задачи сформулированной в настоящей работе, выделены и проанализированы основные параметры, характеризующие частотные свойства синхронизированного генератора СГ без тракта внешней автоматической автоподстройки: полоса синхронизации внешним гармоническим сигналом; остаточная средняя расстройка между частотой входного и выходного сигналов; ширина спектральной линии синхронизированного сигнала; влияние технических флуктуаций частотно-задающего элемента.

Рассмотрим в соответствии с выделенными параметрами частотные свойства СГ при одноходовом воздействии гармонического синхронизирующего сигнала.

Полагаем, что на синхронизирующий вход синхронизированного генератора (СГ) действует внешний синусоидальный сигнал $U(t) = E_0 \cdot \cos \omega_c t$ с амплитудой E_0 и частотой ω_c , мало отличающейся от частоты свободных колебаний ω_0

$$\Delta = (\omega_c - \omega_0) \ll \omega_0.$$

Отвлекаясь от переходных процессов при синхронизации для установившихся значений фазы φ_0 и амплитуды R_0 синхронизированного колебания, получим на выходе СГ гармонический сигнал

$$\chi(t) = R_0(1 + \alpha_0) \cdot \cos(\omega_c t + \varphi_0), \quad (1)$$

где α_0 - приращение амплитуды $\chi(t)$, зависящее от амплитуды E_0 входного гармонического сигнала.

Расчетная величина α_0 определяется по формуле

$$\alpha_0 = \frac{-q \cdot \Delta + p \sqrt{\Delta_0^2 - \Delta^2}}{p^2 + q^2}, \quad (2)$$

где параметры p и q определяются из соотношений

$$q\alpha_0 + \Delta = -\frac{\omega_0 E_0}{2R_0} \cos \varphi_0; \quad p\alpha_0 + \Delta = -\frac{\omega_0 E_0}{2R_0} \sin \varphi_0.$$

Полоса синхронизации, именуемая критической расстройкой частоты входного сигнала относительно частоты свободных колебаний СГ, определяется соотношением

$$\Delta_0 = \frac{\omega_0 E_0}{2R_0} \sqrt{1 + \frac{q^2}{p^2}}. \quad (3)$$

Следовательно, синхронизация возможна лишь при

$$-\Delta_0 < \Delta < +\Delta_0,$$

а общая полоса синхронизации СГ равна $2\Delta_0$.

Остаточная средняя расстройка оценивается в соответствии с формулой [6]

$$v_{\text{ост}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S} \times \left[\int_{1+\Delta}^{\infty} \sqrt{\left(\xi + \frac{\Delta}{\Delta_0}\right)^2 - 1} \cdot e^{-\frac{\xi^2}{2S^2}} d\xi - \int_{1-\Delta}^{\infty} \sqrt{\left(\xi + \frac{\Delta}{\Delta_0}\right)^2 - 1} \cdot e^{-\frac{\xi^2}{2S^2}} d\xi \right], \quad (4)$$

где $S^2 = \langle \xi^2 \rangle$, ξ - безразмерная случайная величина;

$$\xi = \frac{\omega_0}{2\Delta_0} g_c, \quad (g_c - \text{статистическая функция, ха-}$$

рактеризующая медленность флуктуаций амплитуды СГ).

Пределы изменения S по данным, приведенным в [6], составляют $0,05 \dots 0,3$.

Ширина спектральной линии и ее форма зависят от величины флуктуаций частотно-задающего элемента автогенератора и в основном от техниче-

ских флуктуаций емкости. При этой ситуации

$$g_c(t) = \delta C(t) = \frac{\Delta C(t)}{\langle C \rangle}, \quad (5)$$

$$S^2 = \frac{\omega_0^2}{4\Delta_0^2} \langle \delta C^2 \rangle. \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) $\langle C \rangle$ - средняя емкость контура автогенератора, $\Delta C(t)$ - временные флуктуации, $\langle \delta C^2 \rangle$ - дисперсия.

Тогда можно рассчитать ширину спектральной линии СГ согласно выражению

$$\Delta\Omega = \frac{\pi\Delta_0}{2} \Delta_0 \tau_0 E(S, \Delta), \quad (7)$$

где τ_0 - время корреляции флуктуаций параметра

$$(C); \quad \tau_0 = \frac{1}{\Delta_0}.$$

Расчетное выражение для функции $E(S, \Delta)$ достаточно сложное и в данном случае в работе не приведено. При необходимости пользования функцией $E(S, \Delta)$ можно обратиться к [6].

При малых Ω форма спектральной линии СГ имеет вид резонансной кривой с шириной, равной $\Delta\Omega$.

Более строгий подход к рассмотрению поведения синхронизированного сигнала сводится к тому, что реальный синхронизирующий сигнал не может быть строго синусоидальным.

К числу основных недостатков классического варианта СГ можно отнести следующее:

- сильная зависимость остаточной расстройки, ширины спектральной линии и ее формы от уровня E_0 синхронизирующего сигнала и его флуктуаций;
- малая ширина классической расстройки Δ_0 частоты синхронизированного сигнала;
- существенная зависимость монохроматичности, ширины и формы спектральной линии выходного сигнала СГ флуктуаций частотно-задающих элементов (емкости резонансного контура).

Существенным преимуществом СГ прямым синхронизирующим сигналом является простота технической реализации по сравнению с широко применяемыми схемами фазовой и частотной автоподстройки (ФАП и ЧАП), обусловленная отсутствием контура обратной связи, содержащей фазовый или частотный дискриминаторы и фильтры низких частот.

Введем теперь в схему СГ канал дополнительного воздействия на частоту генерации, состоящий из частотного дискриминатора и фильтра нижних частот, а также будем полагать, что на основной синхронизирующий вход поступает гармонический

сигнал в смеси с нормальным «белым» шумом, прошедший формирующий фильтр. В дальнейшем формирующий фильтр (ФФ) будет определять возможную полосу критической расстройки Δ_0 СГ с двойным управлением. Функциональная схема СГ с автоматической перестройкой частоты генерации приведена на рис. 1.

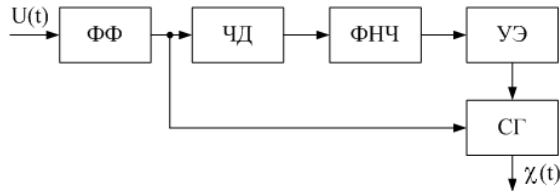


Рис. 1. Функциональная схема синхронизированного генератора с автоматической перестройкой частоты генерации

Здесь: ФФ – формирующий фильтр; ЧД – частотный детектор; ФНЧ – фильтр нижних частот; УЭ – управляющий элемент; СГ – синхронизированный генератор.

Рассмотрим работу схемы СГ, приведенную на рис. 1. На вход ФФ поступает синхронизирующее колебание $U(t)$. В конкретном случае полагаем $U(t) = E_0 \cos \omega_c t$ с некоторыми пределами изменения $\omega_c \pm \Delta\omega$ при $\omega_c = \omega_0$. Если вместе с синхронизирующим сигналом $U(t)$ на вход ФФ поступает шумовая помеха в виде аддитивного нормального шума $n(t)$, то на выходе ФФ будет наблюдаться аддитивная смесь $U(t)$ и квазигармонической помехи

$$U_{\text{ш}}(t) = E_{\text{ш}0} \cos(\omega_{\text{ш}} t + \Psi_t),$$

где $\omega_{\text{ш}}$, Ψ_t и $E_{\text{ш}0}$ определены ранее ($\omega_{\text{ш}} \approx \omega_0$).

Таким образом, сформированный ФФ выходной сигнал в зависимости от входного может рассматриваться как гармонический, квазигармонический и смешанный, который непосредственно синхронизирует СГ.

В тракте ЧД, ФНЧ формируется напряжение, пропорциональное изменению частоты $\omega_c \pm \Delta\omega$ в пределах полосы пропускания ФФ, равной $2\Delta\omega$ при центральной частоте настройки ФФ, равной ω_0 . Напряжение нулевой настройки ЧД выбирается таким, чтобы параметр управляющего элемента (величина емкости варикапа) обеспечивал установочную генерацию СГ, равную ω_0 .

Зависимость изменения напряжения на выход ЧД и УЭ устанавливается таким образом (при регулировке схемы), чтобы текущая настройка СГ по частоте соответствовала частоте синхронизирующего сигнала при ее изменении в пределах $2\Delta\omega$ ($\omega_c = \omega_0$). Такая установочная взаимосвязь (корре-

кция) управляющих воздействий на входы СГ обеспечивает постоянство расстройки

$$\Delta = (\omega_c - \omega_0) \ll \omega_0$$

при любом значении ω_c в пределах ($\omega_0 \pm \Delta\omega$). В идеальном случае $\Delta = 0$ для любого значения текущего изменения ω_c . Реально $\Delta < |\xi|$, ξ – достаточно малая по сравнению с Δ величина.

Оценим величину приращения амплитуды α_0 , воспользовавшись выражением (2) при $\Delta = 0$ (идеальный случай). Из (2) следует, что $\alpha_0 = 0$, т.е. изменений амплитуды R_0 на выходе СГ не будет.

В реальном случае $\Delta \neq 0$, а величина Δ_0 может трактоваться как полоса «захвата» по аналогии с понятием «захват» частоты, используемом при анализе систем ФАП и ЧАП.

При $\alpha_0 = 0$ и $\Delta = 0$ из соотношения (3) можно получить

$$\Delta_0 = \frac{E_0}{R_0} \omega_y,$$

где ω_y – установочное значение свободных колебаний СГ по тракту автоматической перестройки.

С учетом незначительного отличия ω_y от ω_0 (в пределах $\pm\Delta\omega$) можно положить

$$\Delta_0 \approx \text{const} = 2\Delta\omega.$$

Проанализируем среднюю остаточную расстройку, используя выражение (4). В идеальном случае ($\Delta = 0$) из (4) следует, что разность интегралов равна нулю.

Не детализируя поведение остаточной расстройки при $\Delta \neq 0$, можно утверждать, что она примерно постоянна в пределах $\pm\Delta_0$. В то время, как при обычной синхронизации остаточная расстройка меняется очень значительно. При этом средняя частота генерации СГ смещается в сторону частоты его собственных колебаний ω_0 .

Оценим ширину спектральной линии $\Delta\Omega$ и ее форму, опираясь на соотношение (7).

Полагаем τ_0 и $E(S, \Delta)$ такими же как в обычной схеме синхронизации. Из выражения (7) видно, что в обычной схеме Δ_0 является переменной величиной (3), зависящей от параметров p и q , которые связаны с Δ .

В нашем случае при двухвходном управлении $\Delta_0 \approx \text{const}$ и, следовательно $\Delta\Omega = \text{const}$, т.е. ширина спектральной линии колебания $\chi(t)$ является постоянной величиной.

Заключение

В статье приведены результаты качественных

исследований частотных свойств автогенератора, функционирующего в режиме синхронизированных колебаний гармоническим или квазигармоническим входным сигналом с одновременной автоматической перестройкой частоты собственных колебаний. Доказано на аналитическом уровне, что с использованием такого варианта синхронизации автогенератора, практически устраняются основные недостатки одноходового варианта синхронизации. При этом расширяется полоса синхронизации до установленной полосы формирующего фильтра, стабилизируется остаточная величина средней расстройки, ширина спектральной линии и ее форма.

Литература

1. Меркулов, В.И. *Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах Ч.1* [Текст] / В.И. Меркулов, А.И. Канащенков, А.И. Перов. – М.: Радиотехника, 2004. – 312 с.
2. Максимов, М.В. *Радиоэлектронные следя-*

щие системы. Синтез методами теории оптимального управления [Текст] / М.В. Максимов, В.И. Меркулов. – М.: Радио и связь, 1990. – 356 с.

3. Винницкий, А.С. *Автономные радиосистемы* [Текст]: учеб. пособие для вузов / А.С. Винницкий. – М.: Радио и связь, 1986. – 336 с.

4. Зайцев, Г.Ф. *Радиотехнические системы автоматического управления высокой точности* [Текст] / Г.Ф. Зайцев, В.К. Стеклов. – К.: Техника, 1988. – 208 с.

5. 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 // *Системы управління навігації та зв'язку: зб. наук. пр. Держ. підпр. «Централ. науково-дослідний інст. навігації і управління»*. – Вип. 3. – К., 2012. – С. 94-98.

6. Малахов, А.Н. *Флуктуации в автоколебательных системах* [Текст] / А.Н. Малахов. – М.: Наука, 1967. – 660 с.

Поступила в редакцию 10.04.2013, рассмотрена на редколлегии 15.05.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков.

АНАЛІЗ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЇ СЕЛЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ З АВТОМАТИЧНОЮ ПІДСТРОЙКОЮ ЧАСТОТИ СИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА

В.В. Печенін, К.О. Щербина, О.В. Войтенко, Є.П. Мсаллам

На основі виконаних досліджень показано, що використання автоматичної підстройки частоти синхронізованого генератора в активній селективній системі збільшує смугу критичної розстройки синхронізованого генератора до смуги пропускання, що передує активній системі резонансного тракту, стабілізує залишкову розстройку і ширину спектральної лінії розглянутої активної системи в порівнянні зі звичайною одноходовою синхронізацією. При цьому істотно спрощується схемна реалізація активної селективної системи в порівнянні з відомими системами фазової та частотної автопідстройки.

Ключові слова: синтез, фільтр, частота, автогенератор, синхронізація, регулювання, точність, швидкодія, контур.

FREQUENCY ANALYSIS ACTIVE SELECTING SYSTEM WITH AUTOMATIC FREQUENCY LOCKED OSCILLATOR

V.V. Pechenin, K.A. Shcherbina, O.V. Voitenko, E.P. Msallam

Studies show that the using of automatic frequency locked oscillator in the active selecting system increases the bandwidth of the critical mismatch of locked oscillator to the bandwidth of the previous active system resonance tract, stabilizes the residual pitch and width of the spectral line is considered an active system compared to conventional synchronization with one input. This greatly simplifies the implementation of the schem of the active selecting system compared to the known systems the phase and frequency locked.

Keywords: synthesis, filter, frequency oscillator, synchronization, control, precision, speed, circuit.

Печенин Валерий Васильевич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Щербина Ксения Александровна – аспирант кафедры проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: ks.sherbina@yandex.ru.

Войтенко Ольга Викторовна – ассистент Житомирского военного института, Национальный авиационный университет «ЖВИ НАУ», Житомир, Украина.

Мсаллам Екатерина Петровна - канд. техн. наук, доцент кафедры графического и компьютерного моделирования, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.