

УДК 621.373.072.9

В. В. Рапин, канд. техн. наук

НПФ "Газтест"

## АВТОГЕНЕРАТОРНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ И ФАЗО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

*Рассмотрено влияние неидентичности автогенераторов автогенераторного усилителя ЧМ и ФМ сигналов на параметры его выходного сигнала. Исследован характер изменения погрешности в зависимости от величины девиации частоты. Найденны основные параметры, определяющие величину этой погрешности.*

Синхронизированные автогенераторы и их системы обладают большими возможностями и находят широкое применение при решении проблем обработки сигналов. Они позволяют производить усиление и демодуляцию АМ, ЧМ и ФМ сигналов, нелинейную фильтрацию, фазовую коррекцию, используются в качестве следящих систем и т.д. Так, в [1] предложено использовать систему двух синхронизированных на основном тоне одноконтурных автогенераторов в качестве усилителя ЧМ и ФМ сигналов. В процессе анализа предполагалось, что автогенераторы одинаковы. Однако на практике между ними всегда существуют различия, хотя они могут быть и небольшими. Таким образом, целью статьи является исследование влияния неидентичности автогенераторов на характеристики автогенераторного усилителя.

### Математическая модель автогенераторного усилителя

Рассматриваемый усилитель представляет собой систему, состоящую из двух последовательно соединенных одноконтурных автогенераторов, имеющих одинаковые принципиальные схемы, с общей отрицательной фазовой обратной связью первого порядка, рис. 1.

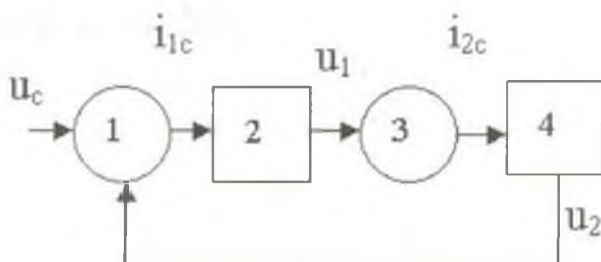


Рис. 1. Функциональная схема автогенераторного усилителя:

1 – блок обратной связи; 2 – первый автогенератор;

3 – преобразователь напряжение–ток; 4 – второй автогенератор

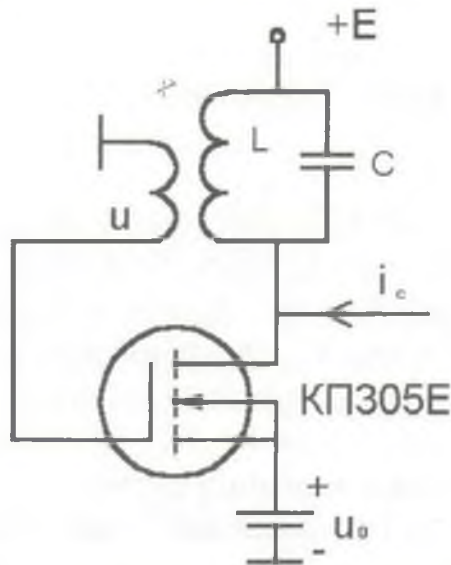


Рис. 2. Принципиальная схема автогенератора

Принципиальная схема такого автогенератора показана на рис. 2. Выбор схемы с трансформаторной обратной связью не является существенным. Все полученные выражения остаются справедливыми для любой иной схемы одноконтурного автогенератора. Сигналами синхронизации служат токи, поступающие совместно с током усилительного элемента в колебательные системы. Сигналом синхронизации второго автогенератора 4 является сигнал первого автогенератора 2  $u_1 = A_1 \cos(\omega_c t + \varphi_1)$ , преобразованный в ток в блоке 3.  $i_{2c} = I_{2c} \cos(\omega_c t + \psi_{2c})$  где  $\psi_{2c} = \varphi_1$ . Непосредственный сигнал синхронизации первого автогенератора формируется в блоке обратной связи 1. Для этого внешний сигнал синхронизации  $u_c = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c)$  возводится в квадрат и переменная составляющая перемножается с сигналом второго автогенератора, который в то же время служит сигналом обратной связи  $u_2 = A_2 \cos(\omega_c t + \varphi_2)$ . Первая гармоническая составляющая произведения и является непосредственным сигналом синхронизации, который в виде тока поступает в контур первого автогенератора 2. Третья гармоника устраняется контуром, и необходимость ее предварительной фильтрации отпадает, что позволяет избежать нежелательных фазовых сдвигов. Таким образом, непосредственный сигнал синхронизации первого автогенератора может быть представлен в виде  $i_{1c} = I_{1c} \cos(\omega_c t + \psi_{1c})$ , где  $\psi_{1c} = 2\varphi_c - \varphi_2$ . Нелинейные характеристики безынерционных усилительных элементов автогенераторов аппроксимируются полиномом четвертой степени  $i = a_{j0} + a_{j1}u_{jd} + a_{j2}u_{jd}^2 + a_{j3}u_{jd}^3 + a_{j4}u_{jd}^4$  (для режима колебаний второго рода с помощью метода, предложенного в [2]), где  $u_{jd} = u_j + u_{j0}$ ,  $u_{j0}$  – фиксированное смещение, а  $u_j$  – сигнал на входе усилительного элемента, он же сигнал автогенератора. Тогда система синхронизированных автогенераторов описывается уравнениями типа Ван-дер-Поля

$$\frac{d^2 u_j}{dt^2} - \varepsilon_j \omega_{0j} (1 - 2\beta_j u_j - 3\gamma_j u_j^2 - 4\delta'_j u_j^3) \frac{du_j}{dt} + \omega_{0j}^2 u_j = k_j R_j \delta_j \omega_{0j} \frac{d\psi_{jc}}{dt}$$

$$1 \leq j \leq 2,$$

где  $\varepsilon_j = \delta_j \alpha_j$  – малый параметр;  $\delta_j = 1/Q_j$ ;  $\alpha_j = (k_j R_j \alpha_{j0} - 1)$ ;  $\beta_j = \beta_{j0}/\alpha'_{j0}$ ;  $\alpha'_{j0} = -\alpha_{j0} + 1/(k_j R_j)$ ;  $\gamma_j = \gamma_{j0}/\alpha'_{j0}$ ;  $\delta'_j = \delta_{j0}/\alpha'_{j0}$ ;  $\beta_{j0} = a_{j2} + 3a_{j3}u_{j0} + 6a_{j4}u_{j0}^2$ ;  $\delta_{j0} = a_{j4}$ ;  $\gamma_{j0} = a_{j3} + 4a_{j4}u_{j0}$ ;  $\alpha_{j0} = a_{j1} + 2a_{j2}u_{j0} + 3a_{j3}u_{j0}^2 + 4a_{j4}u_{j0}^3$ ;  $\omega_{0j}$ ,  $R_j$ ,  $Q_j$  – резонансная частота контура, его сопротивление и добротность;  $k_j = M_j/L_j$  – коэффициент положительной обратной связи;  $L_j$ ,  $M_j$  – индуктивность контура автогенератора и взаимная индуктивность;  $|d\psi_{jc}/d\tau| \ll 1$ .

Решение этих уравнений, как обычно, ищем в виде  $u_1 = A_1 \cos(\omega_c t + \varphi_1)$   $u_2 = A_2 \cos(\omega_c t + \varphi_2)$ . Считаем, что амплитуды и фазы колебаний являются медленно меняющимися функциями времени. Тогда, используя метод усреднения, получаем систему укороченных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{d\tau} + \frac{\varepsilon_1}{2}(y_1^2 - 1)y_1 &= \frac{\varepsilon_1 B_1}{2\alpha_1} \cos \theta_1, \\ \frac{d\theta_1}{d\tau} + \frac{\varepsilon_1 B_1}{2\alpha_1 y_1} \sin \theta_1 &= -\frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}} - \frac{d\psi_{1c}}{d\tau}, \\ \frac{dy_2}{d\tau} + \frac{\varepsilon_2}{2}(y_2^2 - 1)y_2 &= \frac{\varepsilon_2 B_2}{2\alpha_2} \cos \theta_2, \\ \frac{d\theta_2}{d\tau} + \frac{\varepsilon_2 B_2}{2\alpha_2 y_2} \sin \theta_2 &= -\frac{\Delta\omega_2}{\omega_{02}} - \frac{d\psi_{2c}}{d\tau}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\tau = \omega_c t$ ,  $\theta_j = \varphi_j - \psi_{jc}$  – фазовый сдвиг;  $y_j = A_j/A_{j0} \geq 1$  – безразмерная амплитуда колебаний;  $A_j$  и  $A_{j0} = \sqrt{4\alpha'_{j0}/(3\gamma_{j0})}$  – амплитуды колебаний автогенераторов в режиме синхронизации и автономном режиме соответственно;  $B_j = I_{jc}/I_{j0}$ ;  $I_{j0} = A_{j0}/(R_j k_j)$ ;  $\Delta\omega_j = \omega_c - \omega_{0j}$ ;  $I_{jc} = \text{const}$ ,  $1 \leq j \leq 2$ .

Далее, вводя новые переменные  $\theta_1^0 = \varphi_1 - \varphi_c$  и  $\theta_2^0 = \varphi_2 - \varphi_c$ , получим  $\theta_1 = \theta_1^0 + \theta_2^0$ ,  $\theta_2 = \theta_2^0 - \theta_1^0$ . Теперь уравнения (1) можно представить в виде, более удобном для дальнейшего анализа

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{d\tau} + \frac{\varepsilon_1}{2}(y_1^2 - 1)y_1 &= \frac{\varepsilon_1 B_1}{2\alpha_1} \cos(\theta_1^0 + \theta_2^0), \\ \frac{d\theta_1}{d\tau} + \frac{\varepsilon_1 B_1}{2\alpha_1 y_1} \sin(\theta_1^0 + \theta_2^0) &= -\frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}} - \frac{d\varphi_c}{d\tau}, \\ \frac{dy_2}{d\tau} + \frac{\varepsilon_2}{2}(y_2^2 - 1)y_2 &= \frac{\varepsilon_2 B_2}{2\alpha_2} \cos(\theta_2^0 - \theta_1^0), \\ \frac{d\theta_2}{d\tau} + \frac{\varepsilon_2 B_2}{2\alpha_2 y_2} \sin(\theta_2^0 - \theta_1^0) &= -\frac{\Delta\omega_2}{\omega_{02}} - \frac{d\varphi_c}{d\tau}. \end{aligned}$$

Эту систему уравнений и будем считать математической моделью автогенераторного усилителя ЧМ и ФМ сигналов.

### Оценка погрешности слежения

Поскольку сигналы синхронизации предполагаются малыми, то амплитуды колебаний автогенераторов практически можно считать постоянными. Это позволяет ограничиться рассмотрением только фазовых уравнений математической модели, которые представляют наибольший интерес, что существенно упрощает анализ. Таким образом, в дальнейшем имеем дело с уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_1}{d\tau} + \frac{\varepsilon_1 B_1}{2\alpha_1 y_1} \sin(\theta_1^0 + \theta_2^0) &= -\frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}} - \frac{d\varphi_c}{d\tau}, \\ \frac{d\theta_2}{d\tau} + \frac{\varepsilon_2 B_2}{2\alpha_2 y_2} \sin(\theta_2^0 - \theta_1^0) &= -\frac{\Delta\omega_2}{\omega_{02}} - \frac{d\varphi_c}{d\tau}. \end{aligned}$$

Для достижения поставленной цели наиболее простым способом допустим, что производится манипуляция частоты внешнего сигнала синхронизации. Этот случай можно считать простейшим видом частотной модуляции. Тогда при идентичности автогенераторов и стационарном режиме имеем

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon B}{2\alpha y} \sin(\theta_1^0 + \theta_2^0) &= -\frac{\Delta\omega}{\omega_0}, \\ \frac{\varepsilon B}{2\alpha y} \sin(\theta_2^0 - \theta_1^0) &= -\frac{\Delta\omega}{\omega_0}. \end{aligned}$$

Легко видеть, что в этом случае уравнения удовлетворяются, если  $\theta_1^0 = 0$  т. е.  $\varphi_1 = \varphi_c$ . Иными словами, частота и фаза колебаний первого автогенератора системы совпадают с частотой и фазой внешнего сигнала синхронизации, и искажения отсутствуют. Ситуация, однако, меняется, если учесть различия автогенераторов. Тогда те же уравнения можно представить в виде

$$\begin{aligned} \sin(\theta_1^0 + \theta_2^0) &= -\frac{1}{\xi_1} \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}}, & \theta_1^0 + \theta_2^0 &= \arcsin\left(-\frac{1}{\xi_1} \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}}\right), \\ & \text{или} & & \\ \sin(\theta_2^0 - \theta_1^0) &= -\frac{1}{\xi_2} \frac{\Delta\omega_2}{\omega_{02}}, & \theta_2^0 - \theta_1^0 &= \arcsin\left(-\frac{1}{\xi_2} \frac{\Delta\omega_2}{\omega_{02}}\right), \end{aligned}$$

где  $\xi_1 = \frac{\varepsilon_1 B_1}{2\alpha_1 y_1}$ , а  $\xi_2 = \frac{\varepsilon_2 B_2}{2\alpha_2 y_2}$ . Решая их, получим выражение для интересующего параметра- сдвига фазы  $\theta_1^0$

$$\theta_1^0 = (\arcsin\left(-\frac{1}{\xi_1} \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}}\right) - \arcsin\left(-\frac{1}{\xi_2} \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{02}}\right))/2.$$

Вводя вариации параметров второго автогенератора относительно первого, имеем

$$\theta_1^0 = \frac{1}{2\xi_1 \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta\omega_1}{\xi_1\omega_{01}}\right)^2}} \left\{ \frac{\Delta\omega_{02}}{\omega_{01}} \left(1 - \frac{\Delta\xi_2}{\xi_1}\right) \left[1 + \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}} - \frac{\Delta\omega_{02}}{\omega_{01}}\right] + \frac{\Delta\xi_2}{\xi_1} \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}} \right\},$$

где  $\Delta\omega_{02} = \omega_{02} - \omega_{01}$ ,  $\Delta\xi_2 = \xi_2 - \xi_1$ .

Поскольку все вариации являются достаточно малыми величинами, то это выражение можно упростить, выделяя доминирующий член

$$\theta_1^0 = \frac{1}{2\xi_1 \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta\omega_1}{\xi_1\omega_{01}}\right)^2}} \frac{\Delta\omega_{02}}{\omega_{01}}.$$

Следовательно, основной вклад в погрешность отслеживания фазы внешнего сигнала синхронизации вносит различие резонансных частот контуров автогенераторов. Эта составляющая погрешности более чем на порядок превышает другие. Погрешность также изменяется с изменением частоты сигнала синхронизации. При совпадении последней с резонансной частотой контура первого автогенератора ( $\Delta\omega_1 = 1$ ) погрешность минимальна и возрастает с увеличением  $\Delta\omega_1 = \omega_c - \omega_{01}$ . В полосе синхронизации, как известно, имеет место соотношение

$$-1 \leq \frac{\Delta\omega_1}{\xi_1\omega_{01}} \leq 1.$$

### Заключение

Проведенное исследование влияния неидентичности автогенераторов неавтономной системы двух последовательно соединенных одноконтурных LC-автогенераторов, синхронизированных на основном тоне, используемых в качестве усилителя ЧМ и ФМ сигналов, позволило получить выражение, описывающее изменение погрешности представления фазы выходного сигнала. Выявлен параметр-разность резонансных частот контуров автогенераторов, оказывающий основное влияние на величину погрешности. Установлено также, что погрешность изменяется в полосе синхронизации, увеличиваясь от центра к ее концам. В целом же в рабочем диапазоне полосы синхронизации эта погрешность остается малой величиной. С практической точки зрения полученные результаты позволяют произвести оптимизацию режима работы такого усилителя как путем стабилизации отдельных его параметров, так и выбора девиации частоты сигнала синхронизации.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Rapin V.* Synchronized oscillators with the phase negative feedback // *IEEE Trans.* – 2002. – **49**, № 8. – P. 1242–1246.
2. *Рапин В. В.* Аппроксимация проходимых динамических характеристик усилительных элементов LC-автогенераторов // *Изв. вузов. Радиоэлектроника.* – 1988. – **31**, № 5. – С. 77–79.

Поступила в редакцию  
1.10.02

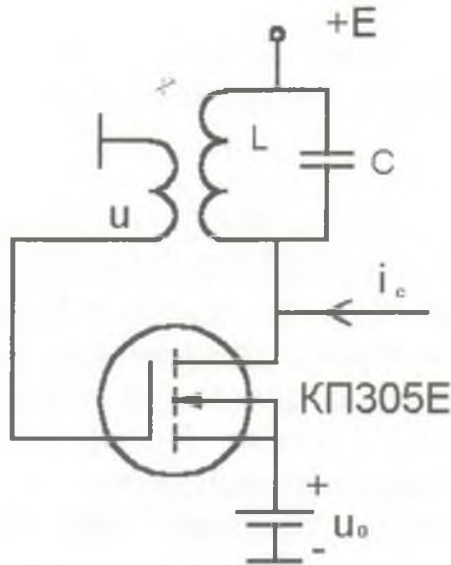


Рис. 2. Принципиальная схема автогенератора

Принципиальная схема такого автогенератора показана на рис. 2. Выбор схемы с трансформаторной обратной связью не является существенным. Все полученные выражения остаются справедливыми для любой иной схемы одноконтурного автогенератора. Сигналами синхронизации служат токи, поступающие совместно с током усилительного элемента в колебательные системы. Сигналом синхронизации второго автогенератора 4 является сигнал первого автогенератора 2  $u_1 = A_1 \cos(\omega_c t + \varphi_1)$ , преобразованный в ток в блоке 3.  $i_{2c} = I_{2c} \cos(\omega_c t + \psi_{2c})$  где  $\psi_{2c} = \varphi_1$ . Непосредственный сигнал синхронизации первого автогенератора формируется в блоке обратной связи 1. Для этого внешний сигнал синхронизации  $u_c = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c)$  возводится в квадрат и переменная составляющая перемножается с сигналом второго автогенератора, который в то же время служит сигналом обратной связи  $u_2 = A_2 \cos(\omega_c t + \varphi_2)$ . Первая гармоническая составляющая произведения и является непосредственным сигналом синхронизации, который в виде тока поступает в контур первого автогенератора 2. Третья гармоника устраняется контуром, и необходимость ее предварительной фильтрации отпадает, что позволяет избежать нежелательных фазовых сдвигов. Таким образом, непосредственный сигнал синхронизации первого автогенератора может быть представлен в виде  $i_{1c} = I_{1c} \cos(\omega_c t + \psi_{1c})$ , где  $\psi_{1c} = 2\varphi_c - \varphi_2$ . Нелинейные характеристики безынерционных усилительных элементов автогенераторов аппроксимируются полиномом четвертой степени  $i = a_{j0} + a_{j1}u_{jd} + a_{j2}u_{jd}^2 + a_{j3}u_{jd}^3 + a_{j4}u_{jd}^4$  (для режима колебаний второго рода с помощью метода, предложенного в [2]), где  $u_{jd} = u_j + u_{j0}$ ,  $u_{j0}$  – фиксированное смещение, а  $u_j$  – сигнал на входе усилительного элемента, он же сигнал автогенератора. Тогда система синхронизированных автогенераторов описывается уравнениями типа Ван-дер-Поля

$$\frac{d^2 u_j}{dt^2} - \varepsilon_j \omega_{0j} (1 - 2\beta_j u_j - 3\gamma_j u_j^2 - 4\delta_j u_j^3) \frac{du_j}{dt} + \omega_{0j}^2 u_j = k_j R_j \delta_j \omega_{0j} \frac{di_{jc}}{dt} \quad 1 \leq j \leq 2,$$

где  $\varepsilon_j = \delta_j \alpha_j$  – малый параметр;  $\delta_j = 1/Q_j$ ;  $\alpha_j = (k_j R_j \alpha_{j0} - 1)$ ;  $\beta_j = \beta_{j0}/\alpha'_{j0}$ ;  $\alpha'_{j0} = -\alpha_{j0} + 1/(k_j R_j)$ ;  $\gamma_j = \gamma_{j0}/\alpha'_{j0}$ ;  $\delta'_j = \delta_{j0}/\alpha'_{j0}$ ;  $\beta_{j0} = a_{j2} + 3a_{j3}u_{j0} + 6a_{j4}u_{j0}^2$ ;  $\delta_{j0} = a_{j4}$ ;  $\gamma_{j0} = a_{j3} + 4a_{j4}u_{j0}$ ;  $\alpha_{j0} = a_{j1} + 2a_{j2}u_{j0} + 3a_{j3}u_{j0}^2 + 4a_{j4}u_{j0}^3$ ;  $\omega_{0j}$ ,  $R_j$ ,  $Q_j$  – резонансная частота контура, его сопротивление и добротность;  $k_j = M_j/L_j$  – коэффициент положительной обратной связи;  $L_j$ ,  $M_j$  – индуктивность контура автогенератора и взаимная индуктивность;  $|d\psi_{jc}/d\tau| \ll 1$ .

Решение этих уравнений, как обычно, ищем в виде  $u_1 = A_1 \cos(\omega_c t + \varphi_1)$   $u_2 = A_2 \cos(\omega_c t + \varphi_2)$ . Считаем, что амплитуды и фазы колебаний являются медленно меняющимися функциями времени. Тогда, используя метод усреднения, получаем систему укороченных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{d\tau} + \frac{\varepsilon_1}{2}(y_1^2 - 1)y_1 &= \frac{\varepsilon_1 B_1}{2\alpha_1} \cos \theta_1, \\ \frac{d\theta_1}{d\tau} + \frac{\varepsilon_1 B_1}{2\alpha_1 y_1} \sin \theta_1 &= -\frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}} - \frac{d\psi_{1c}}{d\tau}, \\ \frac{dy_2}{d\tau} + \frac{\varepsilon_2}{2}(y_2^2 - 1)y_2 &= \frac{\varepsilon_2 B_2}{2\alpha_2} \cos \theta_2, \\ \frac{d\theta_2}{d\tau} + \frac{\varepsilon_2 B_2}{2\alpha_2 y_2} \sin \theta_2 &= -\frac{\Delta\omega_2}{\omega_{02}} - \frac{d\psi_{2c}}{d\tau}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\tau = \omega_c t$ ,  $\theta_j = \varphi_j - \psi_{jc}$  – фазовый сдвиг;  $y_j = A_j/A_{j0} \geq 1$  – безразмерная амплитуда колебаний;  $A_j$  и  $A_{j0} = \sqrt{4\alpha'_{j0}/(3\gamma_{j0})}$  – амплитуды колебаний автогенераторов в режиме синхронизации и автономном режиме соответственно;  $B_j = I_{jc}/I_{j0}$ ;  $I_{j0} = A_{j0}/(R_j k_j)$ ;  $\Delta\omega_j = \omega_c - \omega_{0j}$ ;  $I_{jc} = \text{const}$ ,  $1 \leq j \leq 2$ .

Далее, вводя новые переменные  $\theta_1^0 = \varphi_1 - \varphi_c$  и  $\theta_2^0 = \varphi_2 - \varphi_c$ , получим  $\theta_1 = \theta_1^0 + \theta_2^0$ ,  $\theta_2 = \theta_2^0 - \theta_1^0$ . Теперь уравнения (1) можно представить в виде, более удобном для дальнейшего анализа

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{d\tau} + \frac{\varepsilon_1}{2}(y_1^2 - 1)y_1 &= \frac{\varepsilon_1 B_1}{2\alpha_1} \cos(\theta_1^0 + \theta_2^0), \\ \frac{d\theta_1}{d\tau} + \frac{\varepsilon_1 B_1}{2\alpha_1 y_1} \sin(\theta_1^0 + \theta_2^0) &= -\frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}} - \frac{d\varphi_c}{d\tau}, \\ \frac{dy_2}{d\tau} + \frac{\varepsilon_2}{2}(y_2^2 - 1)y_2 &= \frac{\varepsilon_2 B_2}{2\alpha_2} \cos(\theta_2^0 - \theta_1^0), \\ \frac{d\theta_2}{d\tau} + \frac{\varepsilon_2 B_2}{2\alpha_2 y_2} \sin(\theta_2^0 - \theta_1^0) &= -\frac{\Delta\omega_2}{\omega_{02}} - \frac{d\varphi_c}{d\tau}. \end{aligned}$$

Эту систему уравнений и будем считать математической моделью автогенераторного усилителя ЧМ и ФМ сигналов.

### Оценка погрешности слежения

Поскольку сигналы синхронизации предполагаются малыми, то амплитуды колебаний автогенераторов практически можно считать постоянными. Это позволяет ограничиться рассмотрением только фазовых уравнений математической модели, которые представляют наибольший интерес, что существенно упрощает анализ. Таким образом, в дальнейшем имеем дело с уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_1}{d\tau} + \frac{\varepsilon_1 B_1}{2\alpha_1 y_1} \sin(\theta_1^0 + \theta_2^0) &= -\frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}} - \frac{d\varphi_c}{d\tau}, \\ \frac{d\theta_2}{d\tau} + \frac{\varepsilon_2 B_2}{2\alpha_2 y_2} \sin(\theta_2^0 - \theta_1^0) &= -\frac{\Delta\omega_2}{\omega_{02}} - \frac{d\varphi_c}{d\tau}. \end{aligned}$$

Для достижения поставленной цели наиболее простым способом допустим, что производится манипуляция частоты внешнего сигнала синхронизации. Этот случай можно считать простейшим видом частотной модуляции. Тогда при идентичности автогенераторов и стационарном режиме имеем

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon B}{2\alpha y} \sin(\theta_1^0 + \theta_2^0) &= -\frac{\Delta\omega}{\omega_0}, \\ \frac{\varepsilon B}{2\alpha y} \sin(\theta_2^0 - \theta_1^0) &= -\frac{\Delta\omega}{\omega_0}. \end{aligned}$$

Легко видеть, что в этом случае уравнения удовлетворяются, если  $\theta_1^0 = 0$  т. е.  $\varphi_1 = \varphi_c$ . Иными словами, частота и фаза колебаний первого автогенератора системы совпадают с частотой и фазой внешнего сигнала синхронизации, и искажения отсутствуют. Ситуация, однако, меняется, если учесть различия автогенераторов. Тогда те же уравнения можно представить в виде

$$\begin{aligned} \sin(\theta_1^0 + \theta_2^0) &= -\frac{1}{\xi_1} \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}}, & \theta_1^0 + \theta_2^0 &= \arcsin\left(-\frac{1}{\xi_1} \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}}\right), \\ \sin(\theta_2^0 - \theta_1^0) &= -\frac{1}{\xi_2} \frac{\Delta\omega_2}{\omega_{02}}, & \theta_2^0 - \theta_1^0 &= \arcsin\left(-\frac{1}{\xi_2} \frac{\Delta\omega_2}{\omega_{02}}\right), \end{aligned}$$

или

где  $\xi_1 = \frac{\varepsilon_1 B_1}{2\alpha_1 y_1}$ , а  $\xi_2 = \frac{\varepsilon_2 B_2}{2\alpha_2 y_2}$ . Решая их, получим выражение для интересующего параметра- сдвига фазы  $\theta_1^0$

$$\theta_1^0 = \left( \arcsin\left(-\frac{1}{\xi_1} \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}}\right) - \arcsin\left(-\frac{1}{\xi_2} \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{02}}\right) \right) / 2.$$

Вводя вариации параметров второго автогенератора относительно первого, имеем

$$\theta_1^0 = \frac{1}{2\xi_1 \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta\omega_1}{\xi_1\omega_{01}}\right)^2}} \left\{ \frac{\Delta\omega_{02}}{\omega_{01}} \left(1 - \frac{\Delta\xi_2}{\xi_1}\right) \left[1 + \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}} - \frac{\Delta\omega_{02}}{\omega_{01}}\right] + \frac{\Delta\xi_2}{\xi_1} \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}} \right\},$$

где  $\Delta\omega_{02} = \omega_{02} - \omega_{01}$ ,  $\Delta\xi_2 = \xi_2 - \xi_1$ .

Поскольку все вариации являются достаточно малыми величинами, то это выражение можно упростить, выделяя доминирующий член

$$\theta_1^0 = \frac{1}{2\xi_1 \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta\omega_1}{\xi_1\omega_{01}}\right)^2}} \frac{\Delta\omega_{02}}{\omega_{01}}.$$

Следовательно, основной вклад в погрешность отслеживания фазы внешнего сигнала синхронизации вносит различие резонансных частот контуров автогенераторов. Эта составляющая погрешности более чем на порядок превышает другие. Погрешность также изменяется с изменением частоты сигнала синхронизации. При совпадении последней с резонансной частотой контура первого автогенератора ( $\Delta\omega_1 = 1$ ) погрешность минимальна и возрастает с увеличением  $\Delta\omega_1 = \omega_c - \omega_{01}$ . В полосе синхронизации, как известно, имеет место соотношение

$$-1 \leq \frac{\Delta\omega_1}{\xi_1\omega_{01}} \leq 1.$$

### Заключение

Проведенное исследование влияния неидентичности автогенераторов неавтономной системы двух последовательно соединенных одноконтурных LC-автогенераторов, синхронизированных на основном тоне, используемых в качестве усилителя ЧМ и ФМ сигналов, позволило получить выражение, описывающее изменение погрешности представления фазы выходного сигнала. Выявлен параметр-разность резонансных частот контуров автогенераторов, оказывающий основное влияние на величину погрешности. Установлено также, что погрешность изменяется в полосе синхронизации, увеличиваясь от центра к ее концам. В целом же в рабочем диапазоне полосы синхронизации эта погрешность остается малой величиной. С практической точки зрения полученные результаты позволяют произвести оптимизацию режима работы такого усилителя как путем стабилизации отдельных его параметров, так и выбора девиации частоты сигнала синхронизации.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Rapin V.* Synchronized oscillators with the phase negative feedback // IEEE Trans. – 2002. – **49**, № 8. – P. 1242–1246.
2. *Рапин В. В.* Аппроксимация проходных динамических характеристик усилительных элементов LC-автогенераторов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1988. – **31**, № 5. – С. 77–79.

Поступила в редакцию

1.10.02