УДК 621.373.072.9

В.В. Рапин, канд. техн. наук

НПФ "Газтест", г. Харьков

ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ ФАЗОВАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ АВТОГЕНЕРАТОРАХ

Рассмотрено влияние положительной фазовой обратной связи на характеристики синхронизированных на основном тоне одноконтурных автогенераторов и неавтономных систем синхронизированных автогенераторов. Получены математические модели при полиномиальной аппроксимации нелинейных характеристик усилительных элементов, исследована устойчивость колебаний. Показано, что данная обратная связь приводит не только к количественным изменениям известных показателей, но и обеспечивает появление новых свойств.

Введение. Явление синхронизации автогенераторов в настоящее время широко используется как в процессе научных исследований, так и при решении различного рода технических задач. На сегодняшний день в разных областях науки наблюдается интерес к пространственно-временным задачам. Это проблемы изучения турбулентности, биологически возбудимых сред и ряд других, среди которых и проблемы, появившиеся в результате развития радиотехники и радиосвязи, связанные с изучением пространственных сетей синхронизации [1-3]. Для широкого

УДК 621.373.072.9

В.В. Рапин, канд. техн. наук

НПФ “Газтест”, г. Харьков

ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ ФАЗОВАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ АВТОГЕНЕРАТОРАХ

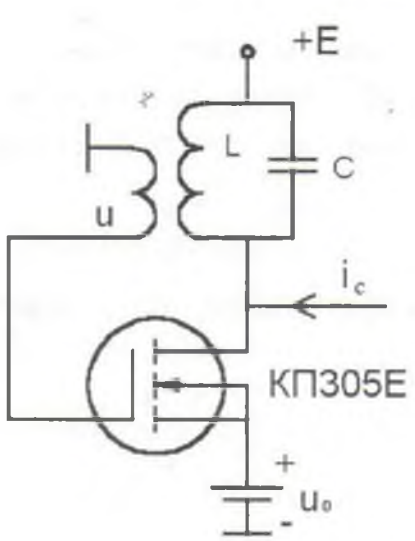
Рассмотрено влияние положительной фазовой обратной связи на характеристики синхронизированных на основном тоне одноконтурных автогенераторов и неавтономных систем синхронизированных автогенераторов. Получены математические модели при полиномиальной аппроксимации нелинейных характеристик усилительных элементов, исследована устойчивость колебаний. Показано, что данная обратная связь приводит не только к количественным изменениям известных показателей, но и обеспечивает появление новых свойств.

Введение. Явление синхронизации автогенераторов в настоящее время широко используется как в процессе научных исследований, так и при решении различного рода технических задач. На сегодняшний день в разных областях науки наблюдается интерес к пространственно-временным задачам. Это проблемы изучения турбулентности, биологически возбудимых сред и ряд других, среди которых и проблемы, появившиеся в результате развития радиотехники и радиосвязи, связанные с изучением пространственных сетей синхронизации [1-3]. Для широкого

класса систем автогенераторов, которые имеют техническое применение и используются при анализе гидродинамических, химических и биологических аналогов, наиболее перспективна структура с обратными связями. *Целью данной статьи является исследование влияния* положительной фазовой обратной связи (ПФОС) на характеристики автогенераторов и неавтономных каскадных систем синхронизированных на основном тоне автогенераторов.

Формирование положительной фазовой обратной связи. Согласно [4] эта процедура в сокращенном виде выглядит следующим образом. Исходный сигнал синхронизации $u_c = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c)$ и сигнал обратной связи, т.е. сигнал синхронизированного автогенератора $u = A\cos(\omega_c t + \varphi)$ после уравнивания амплитуд складываются. Амплитуда полученного сигнала стабилизируется с целью устранения зависимости ее от разности фаз. В результате имеем непосредственный сигнал синхронизации для ПФОС первого порядка $u_{c1} = A_1 \cos(\omega_c t + \psi)$, где $\psi = (\varphi + \varphi_c)/2$. В случае увеличения влияния обратной связи вышеуказанную процедуру можно повторить несколько раз, используя сигнал, полученный на предыдущем цикле в качестве сигнала синхронизации, и прежний сигнал обратной связи. После l-го цикла формирования непосредственного сигнала синхронизации он, как и ранее, имеет вид гармонической функции, а его фаза описывается выражением $\psi = (2^l - 1)/2^l \varphi + \varphi_c / 2^l$.

Математическая модель неавтономной системы автогенераторов, синхронизированных на основном тоне с ПФОС. Допустим, для определенности, что в системе использованы автогенераторы с трансформаторной обратной связью (см. рисунок).



Принципиальная схема синхронизированного автогенератора

Результаты, как известно, не изменятся существенно, если исходить из иной схемы одноконтурного автогенератора. Нелинейные характеристики их безынерционных усилительных элементов аппроксимируются в общем случае полиномом четвертой степени $i = a_{0j} + a_{1j}u_{yj} + a_{2j}u_{yj}^2 + a_{3j}u_{yj}^3 + a_{4j}u_{yj}^4$ (для режима колебаний второго рода с помощью метода, предложенного в [5]), где $u_{yj} = u_j + u_{0j}$ управляющее напряжение, u_{0j}-фиксированное смещение, а u_j-напряжение положительной обратной связи на входе усилительного элемента, оно же является сигналом автогенератора. Непосредственный сигнал синхронизации $i_{cj} = I_{cj}\cos(\omega_c t + \psi_j)$, в данном случае в виде тока, подается в контур. Тогда система одноконтурных квазигармонических автогенераторов, синхронизированных на основном тоне, описывается уравнениями

$$\frac{d^2u_j}{d\tau^2} - \varepsilon_j(1 - 2\beta_j u_j - 3\gamma_j u_j^2 - 4\delta_j' u_j^3)\frac{du_j}{d\tau} + u_j = k_j R_j \delta_j \frac{di_{cj}}{d\tau},$$

$$1 \le j \le N$$

где $\varepsilon_j = \delta_j \alpha_j$-малый параметр; $\tau = \omega_c t$-безразмерное время; $\alpha_j = (k_j R_j \alpha_{0j} - 1) > 0$; $\beta_j = \beta_{0j}/\alpha_{0j}'$; $\gamma_j = \gamma_{0j}/\alpha_{0j}'$; $\delta_j' = \delta_{j0}/\alpha_{j0}'$; $\delta_{0j} = a_{4j}$; $\alpha_{0j} = a_{1j} + 2a_{2j}u_{0j} + 3a_{3j}u_{0j}^2 + 4a_{4j}u_{0j}^3$; $\beta_{0j} = a_{2j} + 3a_{3j}u_{0j} + 6a_{4j}u_{0j}^2$; $\gamma_{0j} = a_{3j} + 4a_{4j}u_{0j}$; $\alpha_{0j}' = -\alpha_{0j} + 1/(k_j R_j)$; $\delta_j = 1/Q_j$; ω_{0j}, R_j, Q_j- резонансная частота контура автогенератора, его сопротивление и добротность, k_j-коэффициент положительной обратной связи, , N-количество автогенераторов.

Учитывая высокую добротность контуров, считаем амплитуду и фазу колебаний медленно меняющимися функциями времени. Пусть также $|d\psi_j/d\tau| << 1$. Решение вышеуказанных уравнений, как известно, может быть найдено в виде $u_j = A_j\cos(\omega_{cj}t + \varphi_j)$. Далее, используя метод усреднения, приходим к укороченным уравнениям, описывающим амплитуду и фазу

$$\frac{dy_j}{d\tau} + \frac{\varepsilon_j}{2}(y_j^3 - y_j) = \frac{\varepsilon_j B_j}{2\alpha_j}\cos\theta_j,$$

$$\frac{d\theta_j}{d\tau} + \frac{\varepsilon_j B_j}{2\alpha_j y_j}\sin\theta_j = -\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)_j - \frac{d\psi_j}{d\tau}, \qquad (1)$$

где $\theta_j = \varphi_j - \psi_j$ -сдвиг фазы; $y_j = A_j / A_{0j}$-безразмерная амплитуда колебаний; $B_j = I_{cj} / I_{0j}$; $I_{0j} = A_{0j}/(R_j k_j)$; $A_{0j} = \sqrt{4\alpha_{0j}/(3\gamma_{0j})}$ и A_j-амплитуды колебаний автогенератора в автономном режиме и в режиме синхронизации; $(\Delta\omega/\omega_0)_j = (\omega_{cj} - \omega_{0j})/\omega_{0j}$. Уравнения (1) и будем считать математической моделью неавтономной системы синхронизированных на основном тоне автогенераторов.

Влияние ПФОС на характеристики синхронизированных автогенераторов. Для одиночных автогенераторов с ПФОС укороченные уравнения (1) записываются следующим образом:

$$\frac{dy}{d\tau} + \frac{\varepsilon}{2}(y^2 - 1)y = \frac{\varepsilon B}{2\alpha}\cos(\theta^0 / 2^l),$$

$$\frac{d\theta^0}{d\tau} + \frac{\varepsilon B}{2y\alpha}\sin(\theta^0 / 2^l) = -\frac{\Delta\omega}{\omega_0} - \frac{d\varphi_c}{d\tau},$$

где $\theta^0 = \varphi - \varphi_c$ - фазовый сдвиг колебаний относительно внешнего сигнала синхронизации.

Исследования показали [6], что колебания в таком автогенераторе устойчивы, а рассматриваемая ПФОС не влияет на полосу синхронизации, в то время как фазовый сдвиг увеличивается. Пределы изменения последнего составили $-\pi/2\times 2^l \le \theta^0 \le \pi/2\times 2^l$. Увеличивается и длительность переходных процессов.

Исследуем теперь влияние общей ПФОС на свойства двух последовательно соединенных синхронизированных идентичных автогенераторов. Обратная связь в этом случае подается с выхода системы на вход, т.е. со второго автогенератора в первый. Будем считать, что выражение $u_c = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c)$, $\varphi_c = \text{const}$ представляет внешний сигнал синхронизации, а выражения $u_1 = A_1 \cos(\omega_c t + \varphi_1)$ и $u_2 = A_2 \cos(\omega_c t + \varphi_2)$ - сигналы первого и второго автогенераторов соответственно. На выходе блока формирования положительной фазовой обратной связи имеем $u_c = A_c \cos(\omega_c t + \psi_1)$, где $\psi_1 = \frac{\varphi_c}{2^l} + \frac{2^l - 1}{2^l}\varphi_2$. Фаза непосредственного сигнала синхронизации второго автогенератора $\psi_2 = \varphi_1$. Запишем математическую модель. Исходя из уравнений (1), получаем

$$\frac{dy_1}{d\tau}+\frac{\varepsilon}{2}(y_1^2-1)y_1=\frac{\varepsilon B}{2\alpha}\cos(\theta_1^0-\frac{2^l-1}{2^l}\theta_2^0),$$

$$\frac{d\theta_1^0}{d\tau}+\frac{\varepsilon B}{2\alpha y_1}\sin(\theta_1^0-\frac{2^l-1}{2^l}\theta_2^0)=-\frac{\Delta\omega}{\omega_0}-\frac{d\varphi_c}{d\tau},$$

$$\frac{dy_2}{d\tau}+\frac{\varepsilon}{2}(y_2^2-1)y_2=\frac{\varepsilon B}{2\alpha}\cos(\theta_2^0-\theta_1^0),$$

$$\frac{d\theta_2^0}{d\tau}+\frac{\varepsilon B}{2\alpha y_2}\sin(\theta_2^0-\theta_1^0)=-\frac{\Delta\omega}{\omega_0}-\frac{d\varphi_c}{d\tau},$$

где $\theta_1{}^0=\varphi_1-\varphi_c$, $\theta_2{}^0=\varphi_2-\varphi_c$.

Данная система позволяет перейти к рассмотрению стационарного режима. В этом случае

$$(y_1^2-1)y_1=\frac{B}{\alpha}\cos(\theta_1^0-\frac{2^l-1}{2^l}\theta_2^0),$$

$$\frac{\varepsilon B}{2\alpha y_1}\sin(\theta_1^0-\frac{2^l-1}{2^l}\theta_2^0)=-\frac{\Delta\omega}{\omega_0},$$

$$(y_2^2-1)y_2=\frac{B}{\alpha}\cos(\theta_2^0-\theta_1^0),$$

$$\frac{\varepsilon B}{2\alpha y_2}\sin(\theta_2^0-\theta_1^0)=-\frac{\Delta\omega}{\omega_0}.$$

Рассмотрим фазовые уравнения. В правой их части стоит расстройка, которая одинакова. Тогда, приравнивая левые части, имеем

$$\frac{1}{y_1}\sin(\theta_1^0-\frac{2^l-1}{2^l}\theta_2^0)=\frac{1}{y_2}\sin(\theta_2^0-\theta_1^0).$$

Для идентичных автогенераторов, когда $y_1=y_2$, эта система удовлетворяется, если $\theta_1^0=\theta_2^0(2^{l+1}-1)/2^{l+1}$ или $\theta_2^0=\theta_1^0 2^{l+1}/(2^{l+1}-1)$. У системы без ПФОС $\theta_2^0=2\theta_1^0$. С увеличением глубины обратной связи различие между сдвигами фаз сигналов автогенераторов уменьшается и в пределе $\theta_2^0\approx\theta_1^0$. Различие амплитуд колебаний оказывает влияние на соотношение фаз и в интервале, где sin может быть представлен своим аргументом, соответствующее выражение приобретает вид $\theta_2^0=2^l\theta_1^0(y_1+y_2)/[(y_1+y_2)2^l-y_2]$.

Исследование устойчивости представляет некоторые трудности и приводит к довольно громоздким выражениям. В связи с этим ограничимся представлением конечного результата. Устойчивые стационарные колебания соответствуют расстройке частоты внешнего сигнала синхронизации относительно резонансных частот контуров автогенераторов, при которой фазовый

сдвиг сигналов автогенераторов относительно непосредственных сигналов синхронизации находится в пределах $-\pi/2 \le \theta \le \pi/2$. Полоса синхронизации в этом случае имеет ширину такую же, как и при отсутствии ПФОС и идентична полосе синхронизации единичного автогенератора.

Заключение. Приведенные в данной работе результаты исследования влияния положительной фазовой обратной связи на свойства синхронизированных на основном тоне одноконтурных автогенераторов и систем позволяют сделать вывод о зависимости этого влияния от количества автогенераторов системы и ее структуры. Данная обратная связь может не только менять известные параметры, такие, как величина сдвига фазы, длительность переходных процессов, количественно, но и приводить к новым свойствам.

ЛИТЕРАТУРА

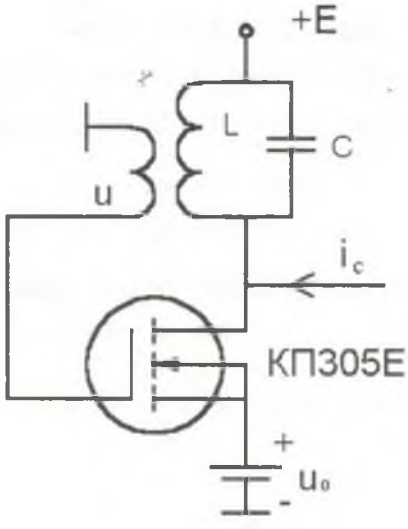
1. *Гапонов-Грехов А.В.* Нелинейная физика. Стохастичность и структуры / А.В. Гапонов-Грехов, М.И. Рабинович // Физика XX века: развитие и перспективы.-М.: Наука, 1984. –С.219-280.
2. Нелинейные волны. Структуры и бифуркации / Под ред. А.В. Гапонова-Грехова, М.И. Рабиновича.-М.: Наука, 1987.-398 с.
3. *Линдсей У.С.* Синхронизация сетей/ *У.С. Линдсей, Ф. Гхазвинян, В.К. Хагман, Х. Дессуки* // Тр. Ин-та инж.по электротехнике и радиоэлектронике. -1985.-**73**, №10.-С.6-31.
4. *Ронин В.В.* Формирование фазовой обратной связи в неавтономных квазигармонических динамических системах// Радиотехника.-2002.- Вып.130.- С.178-181.
5. *Ронин В.В.* Аппроксимация проходных динамических характеристик усилительных элементов *LC* - автогенераторов// Изв. вузов. Радиоэлектроника. - 1988.- **31**, № 5.- С. 77-79.
6. *Ронин В.В.* Фазогенераторный преобразователь с положительной фазовой обратной связью// Измерит. техника. - 2003.- № 12.- С. 48-52.

Поступила в редакцию
12. 04. 2004

класса систем автогенераторов, которые имеют техническое применение и используются при анализе гидродинамических, химических и биологических аналогов, наиболее перспективна структура с обратными связями. *Целью данной статьи является исследование* влияния положительной фазовой обратной связи (ПФОС) на характеристики автогенераторов и неавтономных каскадных систем синхронизированных на основном тоне автогенераторов.

Формирование положительной фазовой обратной связи. Согласно [4] эта процедура в сокращенном виде выглядит следующим образом. Исходный сигнал синхронизации $u_c = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c)$ и сигнал обратной связи, т.е. сигнал синхронизированного автогенератора $u = A\cos(\omega_c t + \varphi)$ после уравнивания амплитуд складываются. Амплитуда полученного сигнала стабилизируется с целью устранения зависимости ее от разности фаз. В результате имеем непосредственный сигнал синхронизации для ПФОС первого порядка $u_{c1} = A_1 \cos(\omega_c t + \psi)$, где $\psi = (\varphi + \varphi_c)/2$. В случае увеличения влияния обратной связи вышеуказанную процедуру можно повторить несколько раз, используя сигнал, полученный на предыдущем цикле в качестве сигнала синхронизации, и прежний сигнал обратной связи. После l-го цикла формирования непосредственного сигнала синхронизации он, как и ранее, имеет вид гармонической функции, а его фаза описывается выражением $\psi = (2^l - 1)/2^l \varphi + \varphi_c / 2^l$.

Математическая модель неавтономной системы автогенераторов, синхронизированных на основном тоне с ПФОС. Допустим, для определенности, что в системе использованы автогенераторы с трансформаторной обратной связью (см. рисунок).



Принципиальная схема синхронизированного автогенератора

Результаты, как известно, не изменятся существенно, если исходить из иной схемы одноконтурного автогенератора. Нелинейные характеристики их безынерционных усилительных элементов аппроксимируются в общем случае полиномом четвертой степени $i = a_{0j} + a_{1j}u_{yj} + a_{2j}u_{yj}^2 + a_{3j}u_{yj}^3 + a_{4j}u_{yj}^4$ (для режима колебаний второго рода с помощью метода, предложенного в [5]), где $u_{yj} = u_j + u_{0j}$ управляющее напряжение, u_{0j}-фиксированное смещение, а u_j-напряжение положительной обратной связи на входе усилительного элемента, оно же является сигналом автогенератора. Непосредственный сигнал синхронизации $i_{cj} = I_{cj}\cos(\omega_c t + \psi_j)$, в данном случае в виде тока, подается в контур. Тогда система одноконтурных квазигармонических автогенераторов, синхронизированных на основном тоне, описывается уравнениями

$$\frac{d^2u_j}{d\tau^2} - \varepsilon_j(1 - 2\beta_j u_j - 3\gamma_j u_j^2 - 4\delta_j' u_j^3)\frac{du_j}{d\tau} + u_j = k_j R_j \delta_j \frac{di_{cj}}{d\tau},$$

$$1 \le j \le N$$

где $\varepsilon_j = \delta_j \alpha_j$-малый параметр; $\tau = \omega_c t$-безразмерное время; $\alpha_j = (k_j R_j \alpha_{0j} - 1) > 0$; $\beta_j = \beta_{0j}/\alpha_{0j}'$; $\gamma_j = \gamma_{0j}/\alpha_{0j}'$; $\delta_j' = \delta_{j0}/\alpha_{j0}'$; $\delta_{0j} = a_{4j}$; $\alpha_{0j} = a_{1j} + 2a_{2j}u_{0j} + 3a_{3j}u_{0j}^2 + 4a_{4j}u_{0j}^3$; $\beta_{0j} = a_{2j} + 3a_{3j}u_{0j} + 6a_{4j}u_{0j}^2$; $\gamma_{0j} = a_{3j} + 4a_{4j}u_{0j}$; $\alpha_{0j}' = -\alpha_{0j} + 1/(k_j R_j)$; $\delta_j = 1/Q_j$; ω_{0j}, R_j, Q_j- резонансная частота контура автогенератора, его сопротивление и добротность, k_j-коэффициент положительной обратной связи, , N-количество автогенераторов.

Учитывая высокую добротность контуров, считаем амплитуду и фазу колебаний медленно меняющимися функциями времени. Пусть также $\left|d\psi_j/d\tau\right| << 1$. Решение вышеуказанных уравнений, как известно, может быть найдено в виде $u_j = A_j\cos(\omega_{cj}t + \varphi_j)$. Далее, используя метод усреднения, приходим к укороченным уравнениям, описывающим амплитуду и фазу

$$\frac{dy_j}{d\tau} + \frac{\varepsilon_j}{2}(y_j^3 - y_j) = \frac{\varepsilon_j B_j}{2\alpha_j}\cos\theta_j,$$

$$\frac{d\theta_j}{d\tau} + \frac{\varepsilon_j B_j}{2\alpha_j y_j}\sin\theta_j = -\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)_j - \frac{d\psi_j}{d\tau}, \qquad (1)$$

где $\theta_j = \varphi_j - \psi_j$ -сдвиг фазы; $y_j = A_j / A_{0j}$-безразмерная амплитуда колебаний; $B_j = I_{cj} / I_{0j}$; $I_{0j} = A_{0j} /(R_j k_j)$; $A_{0j} = \sqrt{4\alpha_{0j}/(3\gamma_{0j})}$ и A_j-амплитуды колебаний автогенератора в автономном режиме и в режиме синхронизации; $(\Delta\omega/\omega_0)_j = (\omega_{cj} - \omega_{0j})/\omega_{0j}$. Уравнения (1) и будем считать математической моделью неавтономной системы синхронизированных на основном тоне автогенераторов.

Влияние ПФОС на характеристики синхронизированных автогенераторов. Для одиночных автогенераторов с ПФОС укороченные уравнения (1) записываются следующим образом:

$$\frac{dy}{d\tau} + \frac{\varepsilon}{2}(y^2 - 1)y = \frac{\varepsilon B}{2\alpha}\cos(\theta^0 / 2^l),$$

$$\frac{d\theta^0}{d\tau} + \frac{\varepsilon B}{2y\alpha}\sin(\theta^0 / 2^l) = -\frac{\Delta\omega}{\omega_0} - \frac{d\varphi_c}{d\tau},$$

где $\theta^0 = \varphi - \varphi_c$- фазовый сдвиг колебаний относительно внешнего сигнала синхронизации.

Исследования показали [6], что колебания в таком автогенераторе устойчивы, а рассматриваемая ПФОС не влияет на полосу синхронизации, в то время как фазовый сдвиг увеличивается. Пределы изменения последнего составили $-\pi/2\times 2^l \le \theta^0 \le \pi/2\times 2^l$. Увеличивается и длительность переходных процессов.

Исследуем теперь влияние общей ПФОС на свойства двух последовательно соединенных синхронизированных идентичных автогенераторов. Обратная связь в этом случае подается с выхода системы на вход, т.е. со второго автогенератора в первый. Будем считать, что выражение $u_c = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c)$, $\varphi_c = \text{const}$ представляет внешний сигнал синхронизации, а выражения $u_1 = A_1 \cos(\omega_c t + \varphi_1)$ и $u_2 = A_2 \cos(\omega_c t + \varphi_2)$- сигналы первого и второго автогенераторов соответственно. На выходе блока формирования положительной фазовой обратной связи имеем $u_c = A_c \cos(\omega_c t + \psi_1)$, где $\psi_1 = \frac{\varphi_c}{2^l} + \frac{2^l - 1}{2^l}\varphi_2$. Фаза непосредственного сигнала синхронизации второго автогенератора $\psi_2 = \varphi_1$. Запишем математическую модель. Исходя из уравнений (1), получаем

$$\frac{dy_1}{d\tau}+\frac{\varepsilon}{2}(y_1^2-1)y_1=\frac{\varepsilon B}{2\alpha}\cos(\theta_1^0-\frac{2^l-1}{2^l}\theta_2^0),$$

$$\frac{d\theta_1^0}{d\tau}+\frac{\varepsilon B}{2\alpha y_1}\sin(\theta_1^0-\frac{2^l-1}{2^l}\theta_2^0)=-\frac{\Delta\omega}{\omega_0}-\frac{d\varphi_c}{d\tau},$$

$$\frac{dy_2}{d\tau}+\frac{\varepsilon}{2}(y_2^2-1)y_2=\frac{\varepsilon B}{2\alpha}\cos(\theta_2^0-\theta_1^0),$$

$$\frac{d\theta_2^0}{d\tau}+\frac{\varepsilon B}{2\alpha y_2}\sin(\theta_2^0-\theta_1^0)=-\frac{\Delta\omega}{\omega_0}-\frac{d\varphi_c}{d\tau}.$$

где $\theta_1{}^0=\varphi_1-\varphi_c$, $\theta_2{}^0=\varphi_2-\varphi_c$.

Данная система позволяет перейти к рассмотрению стационарного режима. В этом случае

$$(y_1^2-1)y_1=\frac{B}{\alpha}\cos(\theta_1^0-\frac{2^l-1}{2^l}\theta_2^0),$$

$$\frac{\varepsilon B}{2\alpha y_1}\sin(\theta_1^0-\frac{2^l-1}{2^l}\theta_2^0)=-\frac{\Delta\omega}{\omega_0},$$

$$(y_2^2-1)y_2=\frac{B}{\alpha}\cos(\theta_2^0-\theta_1^0),$$

$$\frac{\varepsilon B}{2\alpha y_2}\sin(\theta_2^0-\theta_1^0)=-\frac{\Delta\omega}{\omega_0}.$$

Рассмотрим фазовые уравнения. В правой их части стоит расстройка, которая одинакова. Тогда, приравнивая левые части, имеем

$$\frac{1}{y_1}\sin(\theta_1^0-\frac{2^l-1}{2^l}\theta_2^0)=\frac{1}{y_2}\sin(\theta_2^0-\theta_1^0).$$

Для идентичных автогенераторов, когда $y_1=y_2$, эта система удовлетворяется, если $\theta_1^0=\theta_2^0(2^{l+1}-1)/2^{l+1}$ или $\theta_2^0=\theta_1^0 2^{l+1}/(2^{l+1}-1)$. У системы без ПФОС $\theta_2^0=2\theta_1^0$. С увеличением глубины обратной связи различие между сдвигами фаз сигналов автогенераторов уменьшается и в пределе $\theta_2^0\approx\theta_1^0$. Различие амплитуд колебаний оказывает влияние на соотношение фаз и в интервале, где sin может быть представлен своим аргументом, соответствующее выражение приобретает вид $\theta_2^0=2^l\theta_1^0(y_1+y_2)/[(y_1+y_2)2^l-y_2]$.

Исследование устойчивости представляет некоторые трудности и приводит к довольно громоздким выражениям. В связи с этим ограничимся представлением конечного результата. Устойчивые стационарные колебания соответствуют расстройке частоты внешнего сигнала синхронизации относительно резонансных частот контуров автогенераторов, при которой фазовый

сдвиг сигналов автогенераторов относительно непосредственных сигналов синхронизации находится в пределах $-\pi/2 \le \theta \le \pi/2$. Полоса синхронизации в этом случае имеет ширину такую же, как и при отсутствии ПФОС и идентична полосе синхронизации единичного автогенератора.

Заключение. Приведенные в данной работе результаты исследования влияния положительной фазовой обратной связи на свойства синхронизированных на основном тоне одноконтурных автогенераторов и систем позволяют сделать вывод о зависимости этого влияния от количества автогенераторов системы и ее структуры. Данная обратная связь может не только менять известные параметры, такие, как величина сдвига фазы, длительность переходных процессов, количественно, но и приводить к новым свойствам.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гапонов-Грехов А.В.* Нелинейная физика. Стохастичность и структуры / А.В. Гапонов-Грехов, М.И. Рабинович // Физика XX века: развитие и перспективы.-М.: Наука, 1984. –С.219-280.
2. Нелинейные волны. Структуры и бифуркации / Под ред. А.В. Гапонова-Грехова, М.И. Рабиновича.-М.: Наука, 1987.-398 с.
3. *Линдсей У.С.* Синхронизация сетей/ *У.С. Линдсей, Ф. Гхазвинян, З.К. Хагман, Х. Дессуки* // Тр. Ин-та инж.по электротехнике и радиоэлектронике. -1985.-**73**, №10.-С.6-31.
4. *Ронин В.В.* Формирование фазовой обратной связи в неавтономных квазигармонических динамических системах// Радиотехника.-2002.- Вып.130.- С.178-181.
5. *Ронин В.В.* Аппроксимация проходных динамических характеристик усилительных элементов *LC* - автогенераторов// Изв. вузов. Радиоэлектроника. - 1988.- **31**, № 5.- С. 77-79.
6. *Ронин В.В.* Фазогенераторный преобразователь с положительной фазовой обратной связью// Измерит. техника. - 2003.- № 12.- С. 48-51.

Поступила в редакцию
12. 04. 2004