

Г.П. Вечканов, Р.А. Вечканова

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФРОНТА УПРАВЛЯЮЩЕГО ИМПУЛЬСА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ФАЗОВОГО НУЛЬ-ОРГАНА

При работе параметрического генератора (ПГ) в качестве фазового нуля-органа [1], [2] необходимо обеспечить требуемую точность воспроизведения динамического входного сигнала, которая определяется предельно допустимой частотой квантования фазы и динамическими искажениями огибающей фазовой модуляции входного сигнала. Повышение частоты квантования в ПГ связано с увеличением уровня специфичных для него мешающих воздействий.

Как известно, минимально возможная длительность такта квантования определяется суммой времени срабатывания и восстановления. В ПГ срыв колебаний субгармоники может быть произведен в тот момент, когда при заданной чувствительности амплитуда субгармоники достигнет уровня срабатывания порогового элемента индикатора состояний ПГ. Поэтому время срабатывания определяется скоростью возрастания субгармонических колебаний. Увеличение этой скорости связано с повышением крутизны управляющего импульса, что приводит к возрастанию ударных колебаний, приводящих к паразитному фазированию и понижению чувствительности ПГ. Если частоты колебаний подкачки и управляющих импульсов не синхронизированы, то ударные колебания могут рассматриваться как процесс со случайной равновероятной фазой.

Время восстановления определяется временем затухания остаточных колебаний и временем разряда емкости в цепи автосмещения после снятия возбуждения. При выборе слишком малого периода следования управляющих импульсов свободные колебания между ними не успеют затухнуть до необходимой величины, определяемой заданной чувствительностью, происходит паразитное фазирование ПГ остаточными колебаниями. То же соответствует остаточному заряду на емкости цепи автосмещения. При неполном разряде этой емкости уровень шума при отсутствии стабилизации частоты генератора управляющих импульсов может увеличиться. Остаточное напряжение на емкости автосмещения перед каждым последующим возбуждением будет носить случайный характер, что приведет к случайности начальной расстройки, а следовательно, - к флуктуациям положения сепаратрисы на фазовой плоскости.

Поскольку при работе ПГ в качестве фазового нуля-органа нет необ-

ходимости получать большую амплитуду установившихся колебаний субгармоники, то можно исключить из схемы ПГ цепь автосмещения, что исключает помехи, связанные с остаточным зарядом на емкости этой цепи.

Скорость спада остаточных колебаний определяется декрементом затухания контура. Поэтому для уменьшения влияния остаточных колебаний, то есть для увеличения быстродействия ПГ, необходимо осуществлять видеоимпульсный способ возбуждения ПГ [3].

При непосредственном решении дифференциальных уравнений балансного ПГ с учетом разбаланса плеч встречаются некоторые трудности, поскольку приходится решать параметрические дифференциальные уравнения, как минимум, четвертого порядка. Поэтому влияние разбаланса удобно сводить к эквивалентному входному сигналу  $U_{\text{ЭК}}(t)$ , в результате чего получается приближенное исходное дифференциальное уравнение второго порядка. При выводе уравнения предполагается, что разброс элементов плеч ПГ имеет величину второго порядка малости (по сравнению с величиной самих элементов). Эквивалентная схема балансного ПГ представлена на рис.1, где  $L_{1,2}$ ;  $z_{1,2}$ ;  $C_{1,2}(U_{1,2})$  - соответственно индуктивности, активные сопротивления ПГ и емкости варикапов первого и второго плеч  $U_{C_{1,2}}(t)$ ,  $U_{\text{ЭК},1,2}(t)$

напряжения фазировочного и эквивалентного сигналов, пересчитанные на вход каждого плеча ПГ;  $U_n(t)$  напряжение генератора подкачки. Дифференциальное уравнение эквивалентного небалансного ПГ с учетом напряжения разбаланса имеет вид:

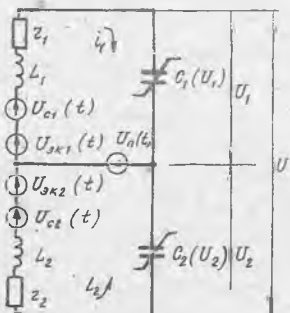


Рис.1. Эквивалентная схема балансного ПГ

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + z(t) \cdot \frac{q}{C_1(U_1)} = \Delta U_{\text{ЭК}}(t) + 2U_n(t) + \Delta z(t) \frac{dq_2}{dt}, \quad (I)$$

где

$$q = q_1 - q_2;$$

$q_1, q_2$  - заряды емкостей каждого плеча,

$$\Delta U_{ЭК}(t) = U_{ЭК1}(t) - U_{ЭК2}(t);$$

$$L = L_{CP} + M \approx 2L_{CP}; \quad L_{CP} = 0,5(L_1 + L_2);$$

$$\Delta z(t) = z_1(t) - z_2(t);$$

$$U_{ЭК}(t) \approx L \frac{dJ_2(t)}{dt} = i_2 \beta_2 L e^{\beta_2 E(t)} I_0(\beta_2 A_1) \frac{dE(t)}{dt};$$

$$J_2(t) = i_2 (e^{\beta_2 U_2} - 1), \quad U_2 = E(t) + u_n,$$

$$u_n = A_1 \cos \psi_1;$$

$A_1, \psi_1$  - амплитуда и полная фаза подкачки;

$$\psi_1 = 2\omega t + \varphi_1;$$

$i_2, \beta_2$  - параметры аппроксимации тока проводимости управляющего диода;

$E(t)$  - напряжение управляющего импульса;

$I_0(\beta_2 A_1)$  - модифицированная функция Бесселя нулевого порядка от аргумента  $\beta_2 A_1$ .

В правой части уравнения (I) содержится сумма фазирующего сигнала и сигнала, эквивалентного разбалансу плеч ПГ. После введения относительных отклонений параметров плеч ПГ напряжение разбаланса

$$\Delta U_{ЭК}(t) = 2\beta_2 i_2 L e^{\beta_2 E(t)} I_0(\beta_2 A_1) \frac{dE(t)}{dt} (\Delta_L + \Delta_{i_2} + \alpha_1 \Delta_\beta + \alpha_2 \Delta_A), \quad (2)$$

$$\text{где } \alpha_1 = 1 + \beta_2 E(t) + \frac{\beta_2 A_1 I_1(\beta_2 A_1)}{I_0(\beta_2 A_1)}; \quad \alpha_2 = \beta_2 A_1 \frac{I_1(\beta_2 A_1)}{I_0(\beta_2 A_1)};$$

$$i_{2,1,2} = i_2 (1 \pm \Delta_{i_2}); \quad L_{1,2} = 0,5L (1 \pm \Delta_L);$$

$$\beta_{2,1,2} = \beta_2 (1 \pm \Delta_\beta); \quad A_{1,1,2} = A_1 (1 \pm \Delta_A)$$

Уравнение (I) решается методом медленно меняющихся амплитуд. Решение можно представить в виде

$$u = A_1 \cos \psi_1 + A_2 \cos \psi_2,$$

где  $A_2, \psi_2$  - амплитуда и полная фаза колебаний субгармоники;

$$\psi_2 = \omega t + \varphi_2.$$

После ряда стандартных операций по укорачиванию [4] уравнения (I) в результате группировки коэффициентов при  $\cos \psi_2$  и  $\sin \psi_2$  полу-

чается система, состоящая из двух дифференциальных уравнений, для решения которых производится переход к координатам  $A_s = A_2 \sin \varphi_2$  ;  
 $A_c = A_2 \cos \varphi_2$  .

Ударные колебания представляют собой процесс со случайной фазой, амплитуда которого детерминирована и изменяется по экспоненциальному закону. Для сокращения количества первичных параметров, характеризующих огибающую амплитуды ударных колебаний, удобно ударные колебания характеризовать эквивалентной амплитудой  $\Lambda_s$  , под которой понимается амплитуда стационарного входного сигнала на частоте субгармоники, эквивалентного ( по воздействию на процесс установления субгармоники) приведенным ко входу ударным колебаниям. Таким образом, можно считать, что на входе ПГ действуют шумы со случайной равновероятной фазой и постоянной амплитудой  $\Lambda_s$  , которая является основной характеристикой влияния ударных колебаний на процесс различения фаз в ПГ. Эквивалентная амплитуда  $\Lambda_s$  входного сигнала  $U_c(t)$  определяется на основе решения дифференциального уравнения при условии, что при известном приведенном ко входу сигнале разбаланса  $\Delta U_{эК}(t)$  и при произвольной фазе подкачки  $\varphi$  , амплитуда субгармоники возрастет не будет. Тогда эквивалентный фазирующий сигнал полностью компенсирует влияние ударных колебаний. Для упрощения теоретических выводов и для уменьшения количества параметров в зависимости, определяющей закон изменения затухания контура ПГ, принято, что передний фронт управляющих импульсов меняется по линейному закону и форма импульсов - трапецеидальная.

Приведение системы укороченных дифференциальных уравнений к канонической форме производится с помощью преобразования  $A_c = X + m Y$  ,  
 $A_s = m_2 X + Y$  , где  $m_1 = \frac{m - \varphi}{\sqrt{m^2 - \varphi^2}}$  ,  $m_2 = -\frac{m + \varphi}{\sqrt{m^2 - \varphi^2}}$  .

Ось  $Y$  при этом является сепаратрисой. Изображающая точка будет находиться на сепаратрисе, если выполняется условие  $X = 0$ . Поэтому представляет интерес решение только одного укороченного дифференциального уравнения, имеющего вид:

$$\frac{dX}{d\tau} = \lambda_1(\tau)X + \frac{F_c(\tau) - m_1 F_s(\tau)}{2} , \quad (3)$$

где  $\lambda_1(\tau) = -\sigma(\tau) + \sqrt{m^2 - \varphi^2}$  ;  $F_s(\tau), F_c(\tau)$  - величины, зависящие от параметров управляющего импульса, схем управления, величин разбаланса плеч ПГ;  $\tau$  - безразмерное время,  $\tau = \Omega t / 2$  .

В общем случае решение уравнения (3) представляется в виде

$$X = e^{-F_1(\tau)} \left[ \varphi_1 + \int_0^{\tau} g_1(\tau) e^{F_1(\tau)} d\tau \right], \quad (4)$$

где

$$F_1(\tau) = - \int_0^{\tau} \lambda_1(\tau) d\tau;$$

$$g_1(\tau) = \frac{F_0(\tau) - m_1 F_3(\tau)}{2};$$

$\varphi_1$  - начальное условие.

Начальное условие  $\varphi_1 = X_0$  ( $X_0 = X(\tau) = 0$ ) определяется при отсутствии сигнала разбаланса и при  $\frac{dX}{d\tau} = 0$ ,

$$X_0 = \frac{\Lambda}{\delta - \sqrt{m^2 - \varphi^2}} (\sin \theta + m_1 \cos \theta). \quad (5)$$

Решение уравнения (3) производится на двух интервалах времени  $\tau = 0 - \tau_{\varphi}$  и  $\tau > \tau_{\varphi}$ . В интервале  $\tau = 0 - \tau_{\varphi}$  решение с начальным условием (5) имеет вид

$$X_1(\tau) = e^{-F_1(\tau)} \left\{ \Lambda \left[ \frac{1}{\lambda_3} + J_0(\tau) \right] (\sin \theta + m_1 \cos \theta) - \right. \\ \left. R_3 \left[ \left[ \Sigma_{\Delta_1} J_3(\tau) - \Sigma_{\Delta_2} J_c(\tau) \right] \cos \frac{\varphi_1}{2} + \left[ \Sigma_{\Delta_1} J_c(\tau) + \Sigma_{\Delta_2} J_3(\tau) \right] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \sin \frac{\varphi_1}{2} \right] \right\}, \quad (6)$$

где  $\Lambda, \theta$  - амплитуда и фаза фазировочного сигнала;

$\tau_{\varphi}$  - длительность переднего фронта управляющего импульса;

$$\tau_{\varphi} = \frac{1}{D} \left( E_0 - \frac{1}{\beta_3} \ln \frac{2\delta}{R_3} \right); \quad \delta - \text{затухание контура III};$$

$D$  - крутизна управляющего импульса;

$E_0$  - напряжение гашения колебаний субгармоники;

$$E_0 = E(\tau) + D\tau = \frac{1}{\beta_3} \ln \frac{1,3 \sqrt{m^2 - \varphi^2} - \delta}{R_3};$$

$$R_3 = (1 + \varphi_0) \frac{\beta_3 \omega I_0 (\beta_3 A_1)}{\omega C_0}; \quad C_0 - \text{емкость варикапа при нулевом смещении};$$

$$\lambda_3 = \delta_3 - \sqrt{m^2 - \varphi^2};$$

$m$  - коэффициент модуляции нелинейной емкости;

$\varphi$  - полная расстройка контура III;

$$J_0(\tau) = \int_0^{\tau} e^{F_1(\tau)} d\tau; \quad J_3(\tau) = \int_0^{\tau} e^{F_1(\tau)} e^{\beta_3 E(\tau)} \sin 2\tau d\tau;$$

$$J_c(\tau) = \int_0^{\tau} e^{F_1(\tau)} e^{\beta_3 E(\tau)} \cos 2\tau d\tau;$$

$\delta_3$  - затухание контура ПГ, при котором наступает срыв субгармонических колебаний;

$$\Sigma_{\Delta_1} = -\left(\frac{D}{2} + A_3 m_1\right) \Sigma_{\Delta} - A_3 m_1 \Delta_L;$$

$$\Sigma_{\Delta_2} = -\left(\frac{D}{2} m_1 + A_3\right) \Sigma_{\Delta} - A_3 \Delta_L;$$

$$\Sigma_{\Delta} = \Delta_{i\partial} + \Delta_L + \alpha_1 \Delta_{\beta} + \alpha_2 \Delta_A;$$

$$A_3 = 2(1 + \psi_0) A_1 \left\{ 1 + \sum_{i=1}^2 c_i \left[ I_0(\beta_i A_1) + I_2(\beta_i A_1) - 1 \right] \right\};$$

$\psi_0$  - начальная расстройка контура ПГ;

$c_1, c_2, \beta_1, \beta_2$  - параметры аппроксимации емкости варикапа.

При  $\tau > \tau_{\varphi}$  решение уравнения (3) легко получить в замкнутой форме. Форма решения имеет вид (4), где

$$? = X_1(\tau_{\varphi}); F_1(\tau) = -\lambda_1 \tau; g_1(\tau) = g_1(\tau_{\varphi} + \tau).$$

Условие нахождения изображающей точки на сепаратрисе  $X = 0$  может быть выполнено, если приравнять к нулю коэффициент при  $e^{\lambda_1 \tau}$ :

$$\Lambda(X_c \cos \theta + X_s \sin \theta) + x_c \cos \frac{\gamma_1}{2} + x_s \sin \frac{\gamma_1}{2} = 0, \quad (7)$$

где  $X_s = \frac{1}{\lambda_1} e^{-F_1(\tau_{\varphi})} + J_0(\tau_{\varphi}); X_c = m_1 X_s;$

$$x_s = -R_{\partial} [(N_2 + M_2) \Sigma_{\Delta} + M_2 \Delta_L];$$

$$x_c = -R_{\partial} [(N_1 + M_1) \Sigma_{\Delta} + M_1 \Delta_L];$$

$$N_1 = \frac{D}{2} [m_1 J_c(\tau_{\varphi}) - J_s(\tau_{\varphi})];$$

$$N_2 = \frac{D}{2} [J_c(\tau_{\varphi}) + m_1 J_s(\tau_{\varphi})];$$

$$M_1 = A_3 \left\{ J_c(\tau_{\varphi}) - m_1 J_s(\tau_{\varphi}) + \frac{e^{A_3 E(\tau_{\varphi})}}{\lambda_1^2 + 4} \times \right. \\ \left. \times [(\lambda_1 - 2m_1) \cos 2\tau_{\varphi} - (\lambda_1 m_1 + 2) \sin 2\tau_{\varphi}] \right\};$$

$$M_2 = -A_3 \left\{ m_1 J_c(\tau_{\varphi}) + J_s(\tau_{\varphi}) + \frac{e^{A_3 E(\tau_{\varphi})}}{\lambda_1^2 + 4} \times \right. \\ \left. \times [(\lambda_1 - 2m_1) \sin 2\tau_{\varphi} + (\lambda_1 m_1 + 2) \cos 2\tau_{\varphi}] \right\}.$$

При отсутствии разбаланса, то есть при  $x_c = x_s = 0$ , фаза  $\theta_c$  сигнала, соответствующая положению изображающей точки на сепаратри-се, в соответствии с условием (7) равна

$$\theta_c = -\alpha \operatorname{arctg} \frac{X_c}{X_s} = -\alpha \operatorname{arctg} m_1. \quad (8)$$

При появлении разбаланса для выполнения условия (7) необходимо изменить фазу входного сигнала. Полагая, что степень разбаланса плеч ПГ мала, можно считать, что необходимое отклонение фазы входного сигнала  $\vartheta$  от  $\theta_c$  также является малой величиной ( $\sin \vartheta \approx \vartheta$ ). Таким образом, влияние ударных колебаний будет скомпенсировано полностью, если к фазирующему сигналу с амплитудой  $\Lambda$  добавить сигнал с частотой субгармоники, амплитудой  $\vartheta \Lambda$  и фазой, противоположной фазе ударных колебаний. Следовательно,  $\vartheta \Lambda$  является амплитудой входного сигнала по воздействию на процесс установления субгармоники, эквивалентного приведенному ко входу сигналу разбаланса:

$$\Lambda_g = \vartheta \Lambda.$$

Полагая

$$\theta = \theta_c + \vartheta,$$

из условия (7) можно получить:

$$\vartheta \Lambda \left( \frac{\vartheta_1}{2} \right) = - \frac{1}{\sqrt{X_s^2 + X_c^2}} \left( x_c \cos \frac{\vartheta_1}{2} + x_s \sin \frac{\vartheta_1}{2} \right). \quad (9)$$

Эквивалентная амплитуда определяется как модуль выражения (9) по фазе  $\frac{\vartheta_1}{2}$ :

$$\Lambda_g = \sqrt{\frac{x_s^2 + x_c^2}{X_s^2 + X_c^2}}. \quad (10)$$

При подстановке в равенство (10) значений  $x_s$ ,  $x_c$ ,  $X_s$ ,  $X_c$  и группировке соответствующим образом членов равенства получается разложение  $\Lambda_g$  по элементарным отклонениям:

$$\Lambda_g = R_g \sqrt{Q^2 (\Delta_{i\beta} + q \Delta_L + \alpha_1 \Delta_\beta + \alpha_2 A_c \Delta_c)^2 + P^2 (\Delta_{i\beta} + p \Delta_L + \alpha_1 \Delta_\beta + \alpha_2 A_c \Delta_c)^2}, \quad (11)$$

где

$$Q = \frac{N_1 + M_1}{\sqrt{X_c^2 + X_s^2}}; \quad P = \frac{N_2 + M_2}{\sqrt{X_c^2 + X_s^2}};$$

$$q = 1 + \frac{M_1}{N_1 + M_1} + \alpha_2 A_L; \quad p = 1 + \frac{M_2}{N_2 + M_2} + \alpha_2 A_L;$$

$$A_L = - \frac{2(1+\varphi_0) \left\{ 1 + \sum_{i=1}^2 c_i [I_0(\beta_i A_i) - I_2(\beta_i A_i) - 1] \right\}}{1 - 4(1+\varphi_0) \left\{ 1 + \sum_{i=1}^2 c_i [I_0(\beta_i A_i) + I_2(\beta_i A_i) - 1] \right\}};$$

$$A_c = 2A_L.$$

Исследование зависимости коэффициентов при  $\Delta_{i2}$ ,  $\Delta_L$ ,  $\Delta_\beta$ ,  $\Delta_c$  от параметров схемы ПГ позволило установить, что амплитуда ударных колебаний возрастает с увеличением крутизны фронта  $D$  и затуханий  $\sigma$  и  $\sigma'$ . Коэффициенты  $p$  и  $q$  соизмеримы с  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и существенно больше 1. Величина  $A_c$  при расстройке, равной нулю, несколько больше 1. Следовательно, степень влияния каждого слагаемого выражения (II), за исключением  $\Delta_{i2}$ , на величину  $A_3$  будет зависеть от величины разбаланса элементов схемы ПГ. Влиянием слагаемого  $\Delta_{i2}$  можно пренебречь.

При использовании специальных методов намотки катушек индуктивности [5] их разброс на частоте 1 МГц может быть сделан примерно на порядок меньше, чем разброс емкостей варикапов, то есть  $\Delta_L \ll \Delta_c$  и влияние разброса индуктивностей может не учитываться.

Исследованиями установлено, что относительный разброс величин  $\beta_i (\Delta_\beta)$  на порядок меньше относительного разброса средней емкости  $c_0 (\Delta_c)$ , влиянием  $\Delta_\beta$  можно пренебречь. Тогда эквивалентная амплитуда ударных колебаний может быть рассчитана по приближенной формуле

$$A_3 = A_3 \Delta_c,$$

где

$$A_3 = R_3 \alpha_2 A_c \sqrt{Q^2 + p^2}.$$

На рис. 2 представлены графики зависимости  $A_3$  от крутизны переднего

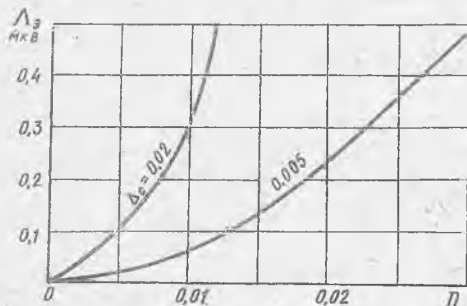


Рис. 2. Графики зависимости

$A_3$  от  $D$  при  $\sigma = 0,2$ ;  $A_1 = 0,2B$ ;  $\sigma_2 = 0,15$ ;  $\varphi_0 = 0$



фронта управляющего импульса при различных величинах  $\Delta_c$ . Из графиков следует, что при обычно рекомендуемом режиме работы и параметрах ПГ, то есть при  $A_1 = 0,2B$ ,  $\sigma = 0,02$ ,  $\sigma_2 = 0,15$ , относительный разброс емкостей варикапов плеч ПГ не должен превышать 0,005. Тогда уровень помех, обусловленных ударными колебаниями, будет не более 0,5 мкВ при достаточно высокой крутизне фронта управляющих импульсов ( $D = 0,03$ ), что соответствует приблизительно 0,01 В/мксек.

### Л и т е р а т у р а

1. Комолов В.П., Рошаль А.С., Трофименко И.Т., Фельдман Б.Я. Параметроны в цифровых устройствах. М., "Энергия", 1968.
2. Вечканов Г.П., Вечканова Р.А. Чувствительный фазометр. Исследования по акустике, электрофизике, радиоэлектронике. Межвузовский сборник, вып. 3/72/, 1975.
3. Ершов В.П., Рассохин Г.И., Яновский Е.А. Емкостные параметроны. Изд. Вычис. центра АН СССР, 1966.
4. Каплян А.Е., Кравцов Ю.А., Рылов В.А. Параметрические генераторы и делители частоты. "Сов. радио", 1966.
5. Струков А.З. Возможности исследования параметрического генератора для расширения пропускной способности аналого - цифровых систем. Труды МАИ, вып.200, 1970.

Г.П. Вечканов, Р.А. Вечканова

### ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО НУЛЬ-ОРГАНА С ВИДЕОИМПУЛЬСНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В фазовых системах, производящих измерение фаз малых ( по сравнению с шумами) сигналов, в качестве высокочувствительных фазовых нуль-органов [1], [2] применяются параметрические генераторы (ПГ). Порог чувствительности такой фазовой системы и ее быстродействие во многом зависят от динамических и шумовых качеств ПГ.

Настоящая работа посвящена исследованию собственных шумов ПГ с видеоимпульсным управлением.

Как показано в [3], при возбуждении ПГ импульсами подкачки среднеквадратичное значение эквивалентных ( приведенных ко входу)