

фронта управляющего импульса при различных величинах Δ_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)

шумов составляет малую величину (до 1мкВ), если добротность контура ПГ выбрана порядка 50 при напряжении подкачки 0,3 - 0,4В. Однако такой способ возбуждения не всегда приемлем из-за низкого быстродействия ПГ [4]. Лучшие результаты получаются при возбуждении ПГ путем изменения затухания его контура. Практически это осуществляется подачей видеоимпульсов на специальные дополнительные управляющие диоды.

На рис. 1а показана схема балансного ПГ с управлением затухания,

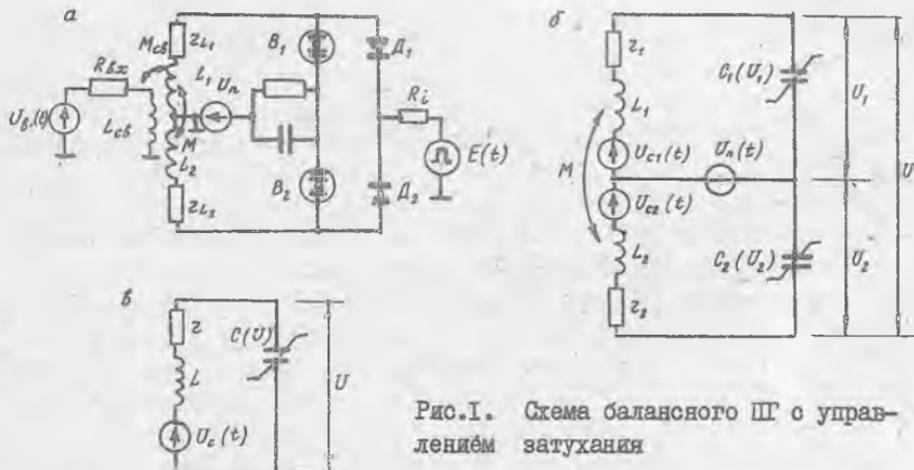


Рис.1. Схема балансного ПГ с управлением затухания

где D_1, D_2 - управляющие диоды; B_1, B_2 - варикапы; $E(t)$ - напряжение генератора видеоимпульсов; R_i - внутреннее сопротивление генератора видеоимпульсов; L_1, L_2 - связанные индуктивности с коэффициентом взаимной индукции M и активными сопротивлениями z_{L1} и z_{L2} ; R, C - элементы цепи автосмещения; $U_n(t)$ - напряжение генератора подкачки; $R_{δx}, L_{δδ}, M_{δδ}$ - параметры входной цепи фазировочного сигнала $U_{δx}(t)$.

Срыв колебаний субгармоники путем увеличения затухания контура ПГ приводит к ускорению спада остаточных колебаний. Это позволяет при заданной чувствительности ПГ уменьшить интервал времени между импульсами запуска, что равносильно увеличению быстродействия.

При исследовании влияния собственных шумов ПГ на процесс различения фазы достаточно учитывать случайность начальных условий при

возбуждении субгармонических колебаний, поскольку, как показал анализ, время корреляции случайного процесса значительно превышает длительность начального этапа установления субгармоники. Скорость возрастания субгармонических колебаний определяется начальными условиями, которые могут быть получены после колебаний на основе решения дифференциальных уравнений балансного ПГ.

На рис. 1б показана эквивалентная схема балансного ПГ, где z_1 и z_2 - активные эквивалентные сопротивления, получающиеся путем пересчета активных сопротивлений управляющих диодов и варикапов; $U_{c_1}(t)$,

$U_{c_2}(t)$ - эквивалентные генераторы сигналов, получающиеся путем пересчета $U_{\delta x}(t)$ на вход каждого плеча ПГ. При идеальной балансировке плеч $U_{c_1}(t) = U_{c_2}(t) = U_{c\delta}(t)$, $L_1 = L_2 = L_{\delta}$, $z_1 = z_2 = z$, $C_1(U_1) = C_2(U_2) = C(U)$ и балансный ПГ эквивалентен простейшему одноконтурному (рис. 1в) с индуктивностью $L = 2L_{\delta}$ и с $U_c(t) = 2U_{c\delta}(t)$.

Поскольку основной интерес представляют исследования процессов, происходящих вблизи сепаратрисы, где колебания субгармоники развиваются достаточно медленно, то все теоретические исследования проводятся с использованием метода медленно меняющихся амплитуд. С этой целью исходное дифференциальное уравнение

$$\left[C_H(U) + u \frac{dC_H(U)}{dU} \right] \left[\frac{d^2 u}{dt^2} + \Omega \delta(t) \frac{du}{dt} \right] + \left[2 \frac{dC_H(U)}{dU} + u \frac{d^2 C_H(U)}{dU^2} \right] \left(\frac{du}{dt} \right)^2 + \Omega^2 u = \Omega^2 U_c(t) \quad (I)$$

определяется в виде

$$u = A_1 \cos(2\omega t + \varphi_1) + A_2 \cos(\omega t + \varphi_2),$$

где A_1 и φ_1 - амплитуда и фаза подкачки; A_2 и φ_2 - амплитуда и фаза субгармоники; $C_H(U)$ - нормированная емкость варикапа $C_H(U) = \frac{C(U)}{C_0}$; Ω - собственная частота контура ПГ; C_0 - емкость варикапа при $U = 0$; $\delta(t)$ - изменяющееся затухание контура ПГ.

Поскольку на начальном этапе установления субгармонических колебаний амплитуда субгармоники соизмерима с шумами, ПГ может рассматриваться как линейная система, поэтому влиянием колебаний субгармоники на коэффициент модуляции емкости, нелинейную расстройку и нелинейное затухание можно пренебречь и считать, что эти параметры определяются лишь амплитудой подкачки. При воздействии шумов на контур ПГ происходят флуктуации изображающей точки и сепаратрисы на фазовой плоскости. Для удобства определения общей дисперсии шумов ПГ необходимо все шумы привести ко входу ПГ, что равносильно определению добавочных флуктуационных составляющих амплитуды и фазы входного сигнала.

Решение дифференциального уравнения III производится в " нормальных " координатах X и Y [3], где укороченные дифференциальные уравнения представляются в канонической форме. "Нормальные" координаты связаны с естественными декартовыми координатами $A_s = A_2 \sin \varphi_2$ и $A_c = A_2 \cos \varphi_2$ с помощью линейного преобразования $A_c = X + \gamma Y$, $A_s = \gamma X + Y$. Ось Y является сепаратрисой, а X - асимптотой. Укороченные дифференциальные уравнения в координатах X , Y имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{d\tau} &= \lambda_1 X + \Lambda \frac{\sin \theta + \gamma \cos \theta}{1 - \gamma^2}; \\ \frac{dY}{d\tau} &= \lambda_2 Y - \Lambda \frac{\cos \theta + \gamma \sin \theta}{1 - \gamma^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где τ - безразмерное время; $\tau = \frac{\Omega}{2} t$;

$$\gamma = \frac{-\varphi}{m + \sqrt{m^2 - \varphi^2}}; \quad \lambda_1, \lambda_2 = -\sigma \pm \sqrt{m^2 - \varphi^2};$$

m - коэффициент модуляции нелинейной емкости;

Λ, θ - амплитуда и фаза входного сигнала;

φ - полная расстройка контура [3], [4], $\varphi = \varphi_0 + \varphi_N$;

φ_0, φ_N - начальная и нелинейная расстройки контура.

В результате решения уравнений (2) и при $\tau = 0$ можно получить начальные условия:

$$X_0 = X_N + \Lambda \frac{\sin \theta + \gamma \cos \theta}{\lambda_1 (1 - \gamma^2)}; \quad (3)$$

$$Y_0 = Y_N - \Lambda \frac{\cos \theta + \gamma \sin \theta}{\lambda_2 (1 - \gamma^2)}, \quad (4)$$

где

$$X_N = \frac{1}{1 - \gamma^2} (A_{cN} - \gamma A_{sN}); \quad Y_N = \frac{1}{1 - \gamma^2} (A_{sN} - \gamma A_{cN});$$

$$A_{sN} = -\Lambda \frac{\varphi \sin \theta - (m - \sigma_3) \cos \theta}{\sigma_3^2 - m^2 + \varphi^2};$$

$$A_{cN} = -\Lambda \frac{\varphi \cos \theta - (m + \sigma_3) \sin \theta}{\sigma_3^2 - m^2 + \varphi^2};$$

θ_0 - затухание контура III, при котором наступает срыв субгармонических колебаний.

Фаза входного сигнала, соответствующая положению изображающей точки на сепаратрисе, определяется из условия $X_0 = 0$ и равна

$$\theta_0 = \arctg \frac{\varphi}{m + \sqrt{m^2 - \varphi^2}} \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что фаза θ_0 не зависит от амплитуды входного сигнала. Следовательно, в линейном случае флуктуации амплитуды Δ не приводят к эквивалентным флуктуациям фазы входного сигнала и из рассмотрения могут быть исключены. Под приведением шумов ко входу понимается определение эквивалентных флуктуаций входного сигнала $\Delta\theta$ относительно среднего значения θ_0 . Для этого в выражение (5) вводятся флуктуационные составляющие. Тогда

$$\Delta\theta \approx \operatorname{tg} \bar{\theta} - \operatorname{tg} \theta_0, \quad (6)$$

где

$$\bar{\theta} = \theta_0 + \theta + \Delta\theta; \quad \operatorname{tg} \bar{\theta} = \frac{\tilde{\xi}}{\bar{m} + \sqrt{\bar{m}^2 - \tilde{\xi}^2}};$$

$$\tilde{\xi} = \tilde{\xi}_0 + \tilde{\xi}_H = \varphi + \Delta\varphi;$$

$$\tilde{\xi}_0 = \frac{\tilde{\omega}_n^2}{4\Omega^2} - 1; \quad \tilde{\xi}_H = \sum_{i=1}^2 c_i [I_0(\beta_i \tilde{A}_i) - 1];$$

$$\tilde{\omega}_n = \omega_n (1 + \Delta\omega); \quad \tilde{A}_i = A_i + \Delta A_i;$$

$$\bar{m} = \sum_{i=1}^2 c_i I_1(\beta_i \tilde{A}_i) = m + \Delta m;$$

Ω - собственная частота контура III; ω_n - частота подкачки;

ΔA - флуктуационная составляющая амплитуды подкачки;

$\Delta\omega$ - относительная флуктуационная составляющая частоты подкачки;

$I_0(\beta_i \tilde{A}_i), I_1(\beta_i \tilde{A}_i)$ - модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка аргумента $\beta_i \tilde{A}_i$; $C(U) = C_0 \left\{ 1 + \sum_{i=1}^2 c_i (e^{\beta_i U} - 1) \right\}$;

$c_1, c_2, \beta_1, \beta_2$ - параметры аппроксимации емкости варикапа для обычно используемого варикапа типа Д901: $c_1 = 0,67$;

$$\beta_1 = 0,255; \quad c_2 = 0,185; \quad \beta_2 = 5,158; \quad c_0 = 0,1 \cdot 10^{-9} \Phi.$$

Напряжение смещения на варикапы принимается равным нулю. После преобразования выражения (6) величина флуктуаций фазы входного сигнала

$$\Delta\theta = N_\omega \Delta\omega + N_A \Delta A, \quad (7)$$

где

$$N_\omega = -2\gamma_\varphi (\varphi_0 + 1);$$

$$N_n = - \sum_{i=1}^2 c_i \beta_i \left\{ \gamma_m I_0(\beta_i A_i) + \left[\gamma \varphi - \frac{\sigma_m}{\beta_i A_i} \right] I_1(\beta_i A_i) \right\};$$

$$\sigma_m = - \frac{\gamma}{\sqrt{m^2 - \varphi^2}}; \quad \sigma_\varphi = \frac{\gamma(1 + \gamma_m \gamma \varphi)}{\varphi}.$$

Из полученного выражения следует, что на флуктуации фазы входного сигнала влияют только флуктуации частоты и амплитуды подкачки.

Принимая во внимание, что все отклонения параметров - случайные величины, из равенства (7) можно получить выражение для дисперсии шумов Π' , обусловленных флуктуациями параметров схемы и подкачки:

$$\sigma_{\theta'}^2 = N_n^2 \sigma_A^2 + N_\omega^2 \sigma_\omega^2, \quad (8)$$

где σ_A^2 , σ_ω^2 - дисперсия флуктуаций амплитуды и частоты подкачки соответственно.

Шумы, действующие в контуре ПГ на частоте субгармоники (высокочастотные шумы), оказывают непосредственное влияние на процесс различения фаз в ПГ. По методике, приведенной в [3], можно получить аналогичное выражение при видеоимпульсном возбуждении ПГ и отсутствии постоянного смещения на варикапах:

$$\sigma_{\lambda \varphi}^2 = \frac{\kappa \Gamma}{C_0} \frac{\sigma(1 + \varphi) \lambda_1^2 \lambda_{12}^2}{(\lambda_1 + \lambda_{12})^2} \left[\frac{\lambda_1 \varphi^2 + \lambda_{12}}{\lambda_1 \lambda_{12}} + \frac{\varphi(\lambda_1^2 - \lambda_{12}^2 - 1)}{\lambda_{22} - \lambda_{12}} \right], \quad (9)$$

где $\varphi = \frac{\sigma_\varphi}{\sigma}$; $\lambda_{12}, \lambda_{22} = \sigma_\varphi \mp \sqrt{m^2 - \varphi^2}$;

κ - постоянная Больцмана; Γ - абсолютная температура.

Общая дисперсия амплитудных шумов, приведенных ко входу ПГ, равна

$$\sigma_{\lambda \varphi x}^2 = \sigma_{\lambda \varphi}^2 + \Lambda^2 (N_n^2 \sigma_A^2 + N_\omega^2 \sigma_\omega^2). \quad (10)$$

При исследовании влияния амплитуды входного сигнала Λ на дисперсию $\sigma_{\lambda \varphi x}^2$ удобно рассматривать относительное среднеквадратичное значение шумов:

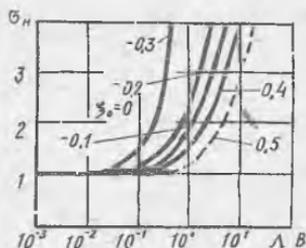
$$\sigma_n = \frac{\sigma_{\lambda \varphi x}}{\sigma_\lambda},$$

где σ_λ - среднеквадратичное значение шумов, рассчитанное по формуле (10) при $\Lambda = 1 \text{ мкВ}$.

На рис. 2 показаны графики зависимости σ_n от Λ при различных φ_0 , σ_φ и A_1 . Из графиков следует, что шумы подкачки начинают влиять на точность различения фаз лишь при $\Lambda > 0,1 \text{ В}$. При мень-

ших амплитудах входного сигнала шумов подкачки можно не учитывать.

Рис.2. График зависимости σ_H от Λ :
 — $\sigma_s = 0,25$; $A_T = 0,38$; - - - $\sigma_s = 0,55$,
 $A_T = 0,4$ В; $\xi_0 = 0$



Шумы, приведенные ко входу ПГ, определяются только по высокочастотным шумам, определяемым выражением (9).

На рис. 3. приведены графики зависимости $\sigma_{\Lambda \delta x}$ от ξ_0 при различных значениях σ_s и A_T , из которых следует, что при малых значениях σ_s минимальная величина $\sigma_{\Lambda \delta x}$ имеет место при начальной настройке ξ_0 , несколько отличной от нуля. При увеличении σ_s значение $\sigma_{\Lambda \delta x}$ возрастает и минимум его перемещается в область $\xi_0 = 0$. С увеличением A_T максимальное среднеквадратичное значение шумов увеличивается. Величина ξ_0 , при которой $\sigma_{\Lambda \delta x}$ имеет минимальное значение (при небольших σ_s), равна $-\xi_H$ и зависит только от амплитуды подкачки A_T .

Для устойчивой надежной работы фазового нуля-органа на ПГ при достаточно низком уровне шумов рекомендуются следующие значения параметров схемы и сигналов: $\xi_0 = 0$; $A_T = (0,2 - 0,3)$ В; $\sigma_s = 0,02$; $\sigma_s = 0,15 - 0,2$.

Из сравнения результатов, полученных и приведенных в [3] (где рассматривается возбуждение ПГ импульсами подкачки), следует, что среднеквадратичное значение шумов при видеоимпульсном возбуждении в несколько раз больше. Повышение уровня шумов снижает быстродействие фазовых систем, использующих ПГ. Однако для сравнения таких систем по быстродействию недостаточно знать уровень приведенных ко входу шумов, необходимо произвести исследование характеристик быстродействия ПГ - уровня паразитных ударных колебаний и ширины зоны нечувствительности.

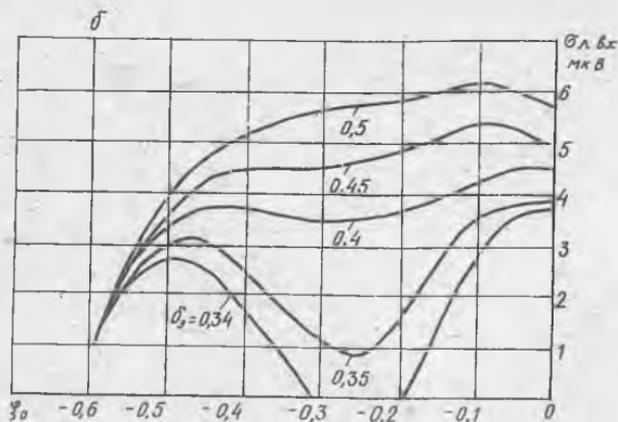
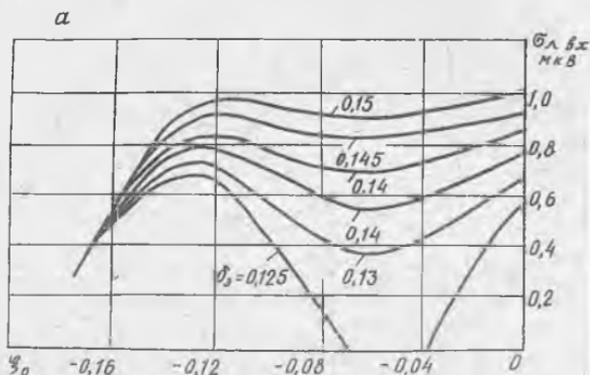


Рис.3. График зависимости

$\sigma_{\Delta \text{ вх}}$ от φ_0
при $\sigma_2 = 0,02$,

$A_{\Gamma} = 0,25$ (а);

$\sigma_2 = 0,02$,

$A_{\Gamma} = 0,4$ В (б)

Л и т е р а т у р а

1. Вечканова Р.А. Фазометр. Авт. св. СССР, № 370545, кл.01 25/00, заявл. 06.10.72., опубл.05.07.74. Бюл. изобр. № II, 1973.
2. Вечканов Г.П., Вечканова Р.А. Чувствительный фазометр. Исследования по акустике, электрофизике, радиоэлектронике. Межвузовский сборник, вып. 3/72/, 1975.
3. Вечканов Г.П., Вечканова Р.А. Влияние тепловых и дробовых шумов на ошибку различения фазы в параметричес-

ком генераторе. Исследования по акустике, электрофизике, радио-электронике. Межвузовский сборник, вып. 3/72/, 1975.

4. Ершов В.П., Рассохин Г.И., Яновский Е.А. Емкостные параметроны. Издание Вычисл.центра АН СССР, 1966.

А.Е. Дубинин, Н.Е. Корочкин, М.А. Куликов

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ АППАРАТОВ С ПОДВИЖНЫМИ СИСТЕМАМИ

В процессе работы аппаратуры, установленной на движущихся объектах, на электровозах, имеют место непрерывные сложные многокомпонентные вибрации, обуславливаемые движением электровоза с различной скоростью и работой электрооборудования внутри высоковольтной камеры.

Причиной вибраций является знакопеременная нагрузка во всех узлах и деталях аппаратов, возникающая вследствие инерции масс деталей. Сотрясения и удары, возникающие при трогании, сцепке, движении на "стрелках" и т.д., создают кратковременные ударные нагрузки. В связи с этим при проектировании тяговых аппаратов необходимо принимать меры, исключающие отказы в работе аппаратуры вследствие воздействия перечисленных факторов.

При расчете и проектировании магнитных систем электромагнитных аппаратов и конструкций их подвижных систем для работы в условиях вибраций большой практический интерес представляет определение частот собственных (свободных) колебаний подвижной системы и динамических сил, возникающих вследствие вибрационных ускорений, ударов и определяющих требования к конструкции подвижной системы тягового электромагнита и противодействующего устройства [1].

Поскольку подвижные системы электромагнитных аппаратов представляют собой механические системы с одной степенью свободы, то их положение при свободных колебаниях, когда приложенная сила $F = 0$, можно описать уравнением [2]:

$$x = Ae^{-z t / 2m} \sin(\omega t + k), \quad (1)$$

где x - отклонение подвижной системы от положения равновесия; A - амплитуда свободных колебаний; z - сопротивление перемещению подвижной системы; ω - угловая частота свободных колебаний подвижной системы [2]

$$\omega^2 = \frac{z}{m} - \left(\frac{z}{2m}\right)^2. \quad (2)$$