

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР
ДЛЯ ТЕЛЕВИЗОННОГО МАЛОШУМЯЩЕГО КАМЕРНОГО ВИДЕОУСИЛИТЕЛЯ

ПАРАМЕТРИЧНИЙ МОДУЛЯТОР
ДЛЯ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО МАЛОШУМНОГО КАМЕРНОГО ВІДЕОПІДСИЛЮВАЧА

THE PARAMETRIC MODULATOR
FOR TELEVISION IN CAMERA TUBE AMPLIFIER

Аннотация. В телевидении в видиконных камерных видеоусилителях для уменьшения собственных шумов применяются параметрические входные каскады; собственные шумы последних существенно меньше. Исследованы передаточные характеристики параметрического видеоусилителя.

Анотація. У телебаченні в камерних відеопідсилювачах на відиконі для зменшення шумів застосовують параметричні входні каскади, шуми яких дуже малі. Досліджені передатні характеристики параметричного відеопідсилювача.

Summary. In television in camera amplifiers on vidicon tubes for noise reduction is used parametric input cascades, own noises of which substantially less. Transmission characteristics of parametric videoamplifier were investigated.

Телевизионные методы используются в системах анализа изображений с целью извлечения полезной информации об изучаемых объектах или процессах. Важнейшим параметром является чувствительность этих систем. Особенно это важно для видиконных камер, поэтому повышение предельной чувствительности видеоусилителей является главной проблемой при их разработке.

В видиконном телевидении первые каскады малошумящего камерного видеоусилителя целесообразно выполнить параметрическими [1...3].

Исследование стационарного режима параметрического видеоусилителя (ПВУ) типа модулятор – демодулятор (М–Д) является важной задачей анализа. Решение этой задачи позволило рассчитать передаточные характеристики, определить усилительные и полосовые параметры ПВУ.

Однако из-за того, что матрицы передаточных функций ПВУ содержат бесконечное число элементов, при исследовании характеристик необходимо оценивать погрешность их расчета [2], что в литературе не описано. Поэтому цель статьи – исследовать передаточные характеристики ПВУ.

Принципиальная схема ПВУ с последовательным емкостным модулятором и резистивным демодулятором представлена на рис. 1.

На схеме рис. 1 обозначены: $VD1$ – параметрический диод; $VD2$ – высокочастотный диод; $G_1 C_1$ – эквивалентные параметры источника сигнала (видикона);

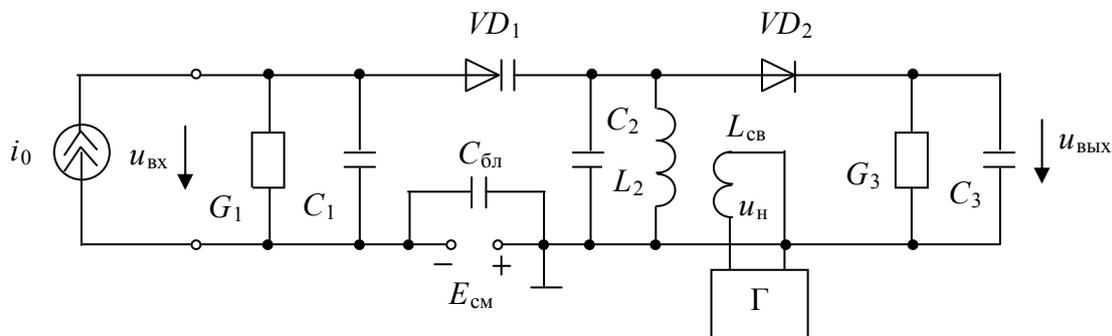


Рисунок 1 – Принципиальная схема параметрического видеоусилителя типа модулятор-демодулятор

где C_2, L_2 – емкость и индуктивность резонансного контура, настроенного на частоту накачки ν ; Γ – генератор накачки; $L_{св}$ – индуктивность катушки связи, которая служит для подачи напряжения накачки в ПВУ; G_3, C_3 – эквивалентные параметры нагрузки видеосуилителя; $E_{см}$ – напряжение смещения для выбора рабочей точки параметрического диода $VD1$; $C_{бл}$ – блокировочная емкость.

Для малого сигнала, если напряжение накачки (с частотой ν) много больше напряжения сигнала (с частотой Ω), нелинейную схему ПВУ можно заменить линейной параметрической моделью, состоящей из емкостного модулятора (ЕМ) и резистивного демодулятора (РД) (рис. 2).

На схеме рис. 2 обозначены: $c(t)$ – параметрическая емкость; $r(t)$ – параметрический резистор; L_2, G_2, C_2 – эквивалентные параметры резонансного контура, настроенного на частоту накачки ν .

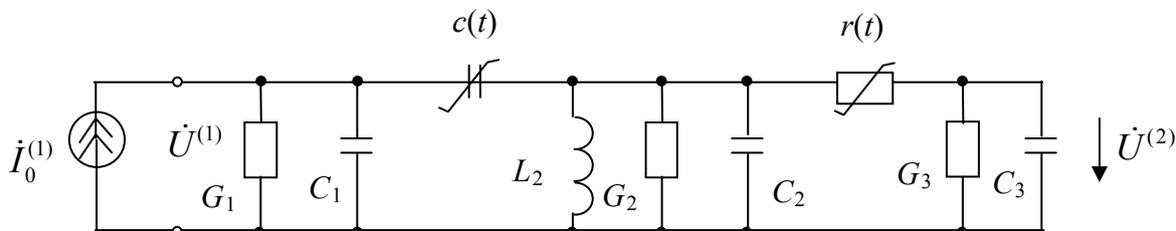


Рисунок 2 – Линейная параметрическая модель ПВУ

Для нахождения сопротивления передачи ПВУ необходимо решить бесконечную систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$[\dot{I}^{(1)}] = [a_{21}] [\dot{U}^{(2)}]. \quad (1)$$

В табл. 1 представлен общий вид матрицы $[a_{21}]$, ее диагональные $C_{k,k}$ и недиагональные $C_{k,k+i}$ $i \neq 0$

элементы.

В табл. 1 использованы коэффициенты рядов Фурье параметрического эластанса $s(t)$ (обратной параметрической емкости)

$$s(t) = \frac{1}{c(t)} = S_{0\sim} \sum_{m=1}^{\infty} 2S_{m\sim} \cos mvt,$$

и параметрического резистора

$$r(t) = R_{0\sim} + \sum_{m=1}^{\infty} 2R_{m\sim} \cos mvt,$$

Всюду необходимо соблюдать условие

$$S_{n\sim} = S_{|n|\sim}; R_{n\sim} = R_{|n|\sim}. \quad (2)$$

Обозначения использованы из статей [1, 2].

Таблица 1 – Матрица $[a_{21}]$

$$\begin{aligned}
 [a_{21}] &= [c] = [Y'] + [Y''] + [Y'''] + [Y']S_{0\sim}[\gamma][j\omega]^{-1}[Y'''] + \\
 &+ [Y']R[Y'''] + [Y']S_{0\sim}[\gamma][j\omega]^{-1}[Y'']R[Y'''] \\
 c_{k,k} &= Y'_k + Y''_k + Y'''_k + Y'_k Y''_k S_{0\sim} \frac{c}{\Gamma_k} + Y'_k Y'''_k R_{0\sim} + Y'_k Y''_k S_{0\sim} \frac{c}{\Gamma_k} + \\
 &+ Y''_k Y'''_k R_{0\sim} + Y'_k Y''_k \left(\sum_{n=-\infty}^{+\infty} S_{n\sim} \square R_{n\sim} \square \frac{Y''_{n+k}}{P_{n+k}} \right); \\
 c_{k,k+i} &= Y'_k Y''_{k+i} \frac{S_{i\sim} \square}{P_{k+i}} + Y'_k Y''_{k+i} R_{i\sim} + Y'_k Y''_{k+i} \frac{S_{i\sim}}{P_{k+i}} + \\
 &+ Y''_k Y''_{k+i} R_{i\sim} + Y'_k Y''_{k+i} \left(\sum_{n=-\infty}^{+\infty} S_{(n+i)\sim} \square R_{n\sim} \square \frac{Y''_{n+k+i}}{P_{n+k+i}} \right); \\
 k &= 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty; i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty; P_k = j\omega_k.
 \end{aligned}$$

Матрицу $[a_{21}]$ в такой форме обозначим $[c]$.

При расчетах выяснилось, что слагаемые в элементах матрицы существенно отличаются друг от друга – примерно в v^2/Ω^2 раз.

Представим матрицу $[c]$ в виде суммы $[c] = [d] + [m]$, где в $[d]$ сгруппированы слагаемые с большими порядками, а в $[m]$ – остальные.

Систему уравнений (1) решаем методом редукции [2].

Усеченную матрицу будем обозначать $[d]$, где N – порядок усеченной матрицы.

Так для усеченной системы уравнений третьего порядка ($N = 1$) матрица $[d]$ представлена в табл. 2.

Таблица 2 – Усеченная матрица $[d]$

$[d] = \frac{Y_0''}{P_0} \begin{matrix} d_{-1,-1} & d_{-1,0} & d_{-1,+1} \\ d_{0,-1} & d_{0,0} & d_{0,+1} \\ d_{+1,-1} & d_{+1,0} & d_{+1,+1} \end{matrix},$	$d_{-1,-1}$	$d_{-1,0}$	$d_{-1,+1}$
	$d_{0,-1}$	$d_{0,0}$	$d_{0,+1}$
	$d_{+1,-1}$	$d_{+1,0}$	$d_{+1,+1}$

где

$$d_{0,0} = Y_0' Y_0''' S_{0\sim} R_{0\sim} + Y_0' S_{0\sim} + P_0 Y_0''' R_{0\sim},$$

$$d_{-1,-1} = Y_{-1}' Y_{-1}''' S_{1\sim} R_{1\sim},$$

$$d_{+1,+1} = Y_{+1}' Y_{+1}''' S_{1\sim} R_{1\sim},$$

$$d_{-1,0} = Y_{-1}' Y_0''' S_{1\sim} R_{0\sim} + Y_{-1}' S_{1\sim},$$

$$d_{-1,+1} = Y_{-1}' Y_{+1}''' R_{1\sim} S_{1\sim},$$

$$d_{0,-1} = Y_0' Y_{-1}''' R_{1\sim} S_{0\sim},$$

$$d_{0,+1} = Y_0' Y_{+1}''' R_{1\sim} S_{0\sim},$$

$$d_{+1,-1} = Y_{+1}' Y_{-1}''' R_{1\sim} S_{1\sim},$$

$$d_{+1,0} = Y_{+1}' Y_0''' R_{0\sim} S_{1\sim} + Y_{+1}' S_{1\sim}.$$

При последовательном усечении матрицы $[c]$ получаем последовательные суммы

$$[c] = [d] + [m], \tag{3}$$

в которых для членов $d_{k,i}$ и $m_{k,i}$ выполняется неравенство

$$d_{k,k+i} \geq (v^2 / \Omega^2) m_{k,k+i}. \tag{4}$$

Оценим множитель: для ПВУ при $\Omega = 2\pi(10^2 \dots 10^7) \text{ c}^{-1}$ и $v = 2,09 \cdot 10^9 \text{ c}^{-1}$ множитель имеет пределы $v^2 / \Omega^2 = 10^3 \dots 10^{13}$. Следовательно, для решения исходного уравнения требуется ЭВМ повышенной точности и специальные алгоритмы.

Исследования, выполненные Вараввой Ю.В. и другими авторами, показали, что матрица $[c]$ близка к особенной, так как $\det [d] \approx 0$.

В этой статье предложен метод, напоминающий метод подсьем. Кратко поясним его суть и приведем результаты.

Параметрическую модель ПВУ (рис. 2) представим в виде двух четырехполюсников, как показано на рис. 3. Общую матрицу $[a]$ найдем как произведение матриц четырехполюсников

$$[a] = [a_1] \cdot [a_2].$$

Сначала были получены необходимые соотношения и вычислены входные полные комплексные сопротивления демодулятора по формулам, представленным в табл. 3 на комбинационных частотах.

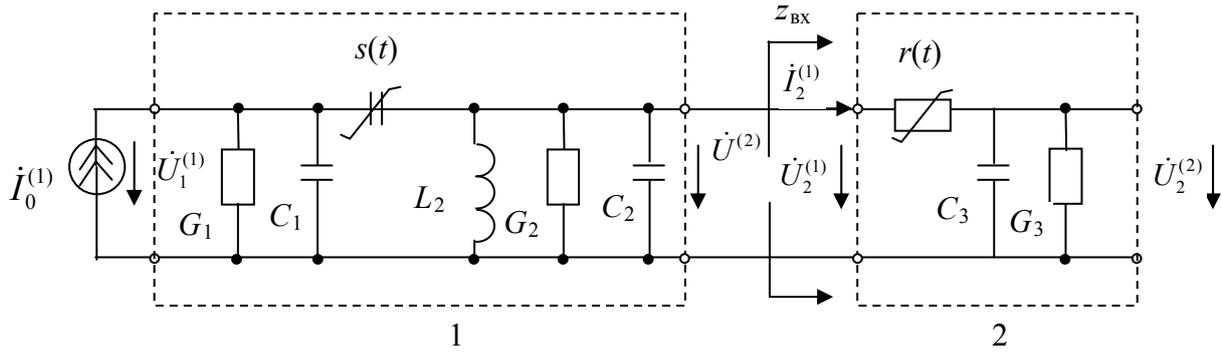


Рисунок 3 – Линейная параметрическая модель после преобразований

Таблица 3 – Входные полные сопротивления резистивного демодулятора на комбинационных частотах

$$\begin{aligned}
 Z_{\text{вх}0} &= \frac{\dot{U}_0^{(1)}}{\dot{I}_0^{(1)}} = R_{0\sim} + \frac{1}{Y_0'''} + R_{1\sim} \frac{Y_{-1}'''}{Y_0'''} \cdot \frac{\dot{U}_{-2}^{(2)}}{\dot{U}_0^{(2)}} + \\
 &+ R_{1\sim} \frac{Y_{+1}'''}{Y_0'''} \cdot \frac{\dot{U}_{+1}^{(2)}}{\dot{U}_0^{(2)}} + R_{2\sim} \frac{Y_{-2}'''}{Y_0'''} \cdot \frac{\dot{U}_{-2}^{(2)}}{\dot{U}_0^{(2)}} + R_{2\sim} \frac{Y_{+2}'''}{Y_0'''} \cdot \frac{\dot{U}_{+2}^{(2)}}{\dot{U}_0^{(2)}} + \dots; \\
 Z_{\text{вх}-1} &= \frac{\dot{U}_{-1}^{(1)}}{\dot{I}_{-1}^{(1)}} = R_{0\sim} + \frac{1}{Y_0'''} + R_{1\sim} \frac{Y_0'''}{Y_{-1}'''} \cdot \frac{\dot{U}_0^{(2)}}{\dot{U}_{-1}^{(2)}} + \\
 &+ R_{1\sim} \frac{Y_{-2}'''}{Y_{-1}'''} \cdot \frac{\dot{U}_{-2}^{(2)}}{\dot{U}_{-1}^{(2)}} + R_{2\sim} \frac{Y_{+1}'''}{Y_{-1}'''} \cdot \frac{\dot{U}_{+1}^{(2)}}{\dot{U}_{-1}^{(2)}} + R_{2\sim} \frac{Y_{-3}'''}{Y_{-1}'''} \cdot \frac{\dot{U}_{-3}^{(2)}}{\dot{U}_{-1}^{(2)}} + \dots; \\
 Z_{\text{вх}s} &= \frac{\dot{U}_s^{(1)}}{\dot{I}_s^{(1)}} = R_{0\sim} + \frac{1}{Y_s'''} + R_{1\sim} \frac{Y_{s-1}'''}{Y_s'''} \cdot \frac{\dot{U}_{s-1}^{(2)}}{\dot{U}_s^{(2)}} + \\
 &+ R_{1\sim} \frac{Y_{s+1}'''}{Y_s'''} \cdot \frac{\dot{U}_{s+1}^{(2)}}{\dot{U}_s^{(2)}} + R_{2\sim} \frac{Y_{s-2}'''}{Y_s'''} \cdot \frac{\dot{U}_{s-2}^{(2)}}{\dot{U}_s^{(2)}} + R_{2\sim} \frac{Y_{s+2}'''}{Y_s'''} \cdot \frac{\dot{U}_{s+2}^{(2)}}{\dot{U}_s^{(2)}} + \dots
 \end{aligned}$$

($s = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty$)

Затем вычислены передаточные функции ПВУ по формулам, представленным в табл. 4.

Таблица 4 – Передаточные функции ПВУ на комбинационных частотах

$$\begin{aligned}
 Z_{0,0}(j\omega) &= Z'_{0,0}(j\omega) \cdot K''_{0,0}(j\omega) + Z'_{-1,0}(j\omega) \cdot K''_{0,-1}(j\omega) + \\
 &+ Z'_{+1,0}(j\omega) \cdot K''_{0,+1}(j\omega + j\gamma) + Z'_{-2,0}(j\omega) \cdot K''_{0,-2}(j\omega - j2\gamma) + \dots; \\
 Z_{-1,0}(j\omega) &= Z'_{0,0}(j\omega) \cdot K''_{-1,0}(j\omega) + Z'_{-1,0}(j\omega) \cdot K''_{-1,-1}(j\omega - j\gamma) + \\
 &+ Z'_{+1,0}(j\omega) \cdot K''_{-1,+1}(j\omega + j\gamma) + Z'_{-2,0}(j\omega) \cdot K''_{-1,-2}(j\omega - j2\gamma) + \dots; \\
 Z_{+1,0}(j\omega) &= Z'_{0,0}(j\omega) \cdot K''_{+1,0}(j\omega) + Z'_{-1,0}(j\omega) \cdot K''_{+1,-1}(j\omega - j\gamma) + \\
 &+ Z'_{+1,0}(j\omega) \cdot K''_{+1,+1}(j\omega + j\gamma) + Z'_{-2,0}(j\omega) \cdot K''_{+1,-2}(j\omega - j2\gamma) + \dots
 \end{aligned}$$

В табл. 4 $Z'_{m,n}$ – сопротивление передачи модулятора на комбинационной частоте, $K''_{m,n}$ – коэффициент передачи демодулятора на комбинационной частоте, который равен

$$K_{m,n}'' = \frac{Z_{m,n}''}{Z_{ВХП}} \quad (n = 0, 1, \dots, \infty; m = 0, 1, \dots, \infty).$$

Данные схемы: $\nu = 2\pi \cdot 3,33 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$; $L_2 = 6,53 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}$; $C_1 = 20 \text{ пФ}$; $C_2 = 1,065 \text{ пФ}$; $C_3 = 3 \text{ пФ}$; $G_1 = 10^{-5} \text{ См}$; $G_2 = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ См}$; $G_3 = 10^{-5} \text{ См}$.

Параметры параметрического эластанса $s(t)$ и параметрического резистора $r(t)$ имеют следующие значения.

$$s(t) = S_{0\sim} \sum_{m=1}^{\infty} 2S_{m\sim} \cos mvt,$$

$$S_{0\sim} = 0,5 (S_{\text{макс}} + S_{\text{мин}}), \quad S_{m\sim} = \frac{1}{\pi} (S_{\text{макс}} - S_{\text{мин}}) \frac{\sin(m\pi 0,5)}{m},$$

где $S_{\text{макс}} = 0,855 \cdot 10^{12} \text{ Ф}^{-1}$, $S_{\text{мин}} = 0,27 \cdot 10^{12} \text{ Ф}^{-1}$,

и $r(t) = R_{0\sim} + \sum_{m=1}^{\infty} 2R_{m\sim} \cos mvt,$

$$R_{0\sim} = -0,5 (R_{\text{макс}} + R_{\text{мин}}), \quad R_{m\sim} = -\frac{1}{\pi} (R_{\text{макс}} - R_{\text{мин}}) \frac{\sin(m\pi 0,5)}{m},$$

где $R_{\text{макс}} = 1,85 \cdot 10^6 \text{ Ом}$, $R_{\text{мин}} = 1,063 \cdot 10^3 \text{ Ом}$.

При указанных параметрах схемы ПВУ полоса пропускания демодулятора на уровне 0,707 равна $f_{в\text{ гр}} = 1 \text{ МГц}$, на порядок шире полосы пропускания модулятора. Входное сопротивление демодулятора много больше резонансного сопротивления контура модулятора, поэтому можно пренебречь шунтирующим действием демодулятора на модулятор. Следовательно, сопротивление передачи Z_n и частотные свойства ПВУ определяются, в основном, параметрами параметрического модулятора.

По результатам вычислений при П-накачке построены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и фазо-частотные характеристики (ФЧХ) ПВУ, которые представлены на рис. 4.

Из сказанного можно сделать следующие выводы:

1. Передаточная функция на основной частоте $Z_{0,0}$ позволяет вычислить напряжение сигнала на выходе ПВУ, определить полосу пропускания и фазовые искажения ПВУ.
2. Полоса пропускания исследованного ПВУ на уровне 0,707 равна $f_{в\text{ гр}} = 1 \text{ МГц}$, фазовый сдвиг на граничной частоте $\Delta\varphi_{в} = -65^\circ = -0,36 \pi$.
3. Передаточные функции на комбинационных частотах $Z_{+1,0}$ и $Z_{-1,0}$ показывают влияние этих частот на выходной сигнал. Модуль сопротивления передачи на первых суммарной и разностной частотах $|Z_{\pm 1,0}|$ много меньше сопротивления передачи основного колебания $|Z_{0,0}|$. Следовательно, мешающее действие неосновных комбинационных колебаний в схеме ПВУ проявляется очень слабо.

В заключение можно высказать следующее. В статье исследованы передаточные характеристики параметрического видеосушителя, которые позволяют определить его усилительные и полосовые свойства.

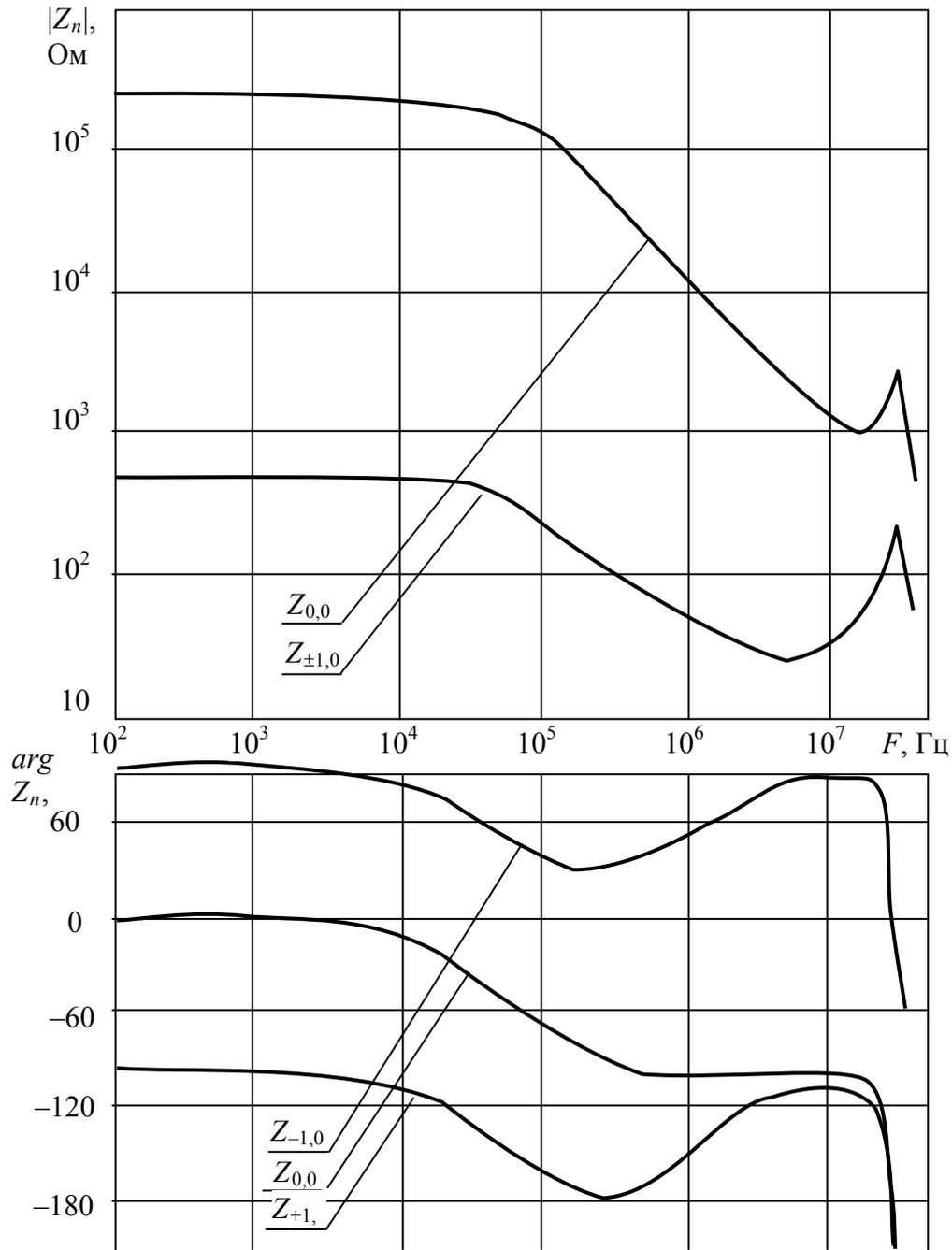


Рисунок 4 – Частотные характеристики ПВУ при П-накачке

Литература

1. *Варава Ю.В.* Параметрический модулятор телевизионного маломощного камерного видеоусилителя / Ю.В. Варава, В.А. Арбузников // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2012. – № 1. – С. 64-71.
2. *Варава Ю.В.* Точный стационарный режим параметрического модулятора телевизионного маломощного камерного видеоусилителя / Ю.В. Варава, В.А. Арбузников, Е.М. Рудый // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2011. – № 2. – С. 49-62.
3. *Варава Ю.В.* Параметрический модулятор-демулятор телевизионного маломощного камерного видеоусилителя / Ю.В. Варава, В.А. Арбузников // 67-ма наук.-техн. конф. проф.-виклад. складу, науковців, аспірантів та студентів: матер. конф., (5-7 грудня 2012 р.). Частина I. – Одеса, 2012. – С.92-96.