

**ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ МАЛОШУМЯЩИЕ КАМЕРНЫЕ ВИДЕОУСИЛИТЕЛИ
С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ВХОДОМ**

**ТЕЛЕВІЗІЙНІ МАЛОШУМНІ КАМЕРНІ ВІДЕОПІДСИЛЮВАЧІ
З ПАРАМЕТРИЧНИМ ВХОДОМ**

**TELEVISIONS IN CAMERA TUBE AMPLIFIERS
WITH PARAMETRIC INPUT CASCADES**

Аннотация. В телевидении в камерных видеоусилителях на видиконе для уменьшения шумов применяются параметрические входные каскады, собственные шумы которых существенно меньше, а площадь усиления такого каскада существенно больше. Оценивается площадь усиления в зависимости от различных параметров схемы.

Анотація. У телебаченні в камерних відео підсилювачах на відиконі для зменшення шумів застосовують параметричні входні каскади, шуми яких дуже малі, а площа підсилювання більша. Оцінюється площа підсилювання в залежності від різних параметрів схеми.

Summary. In television in camera amplifiers on camera tubes for noise reduction is used parametric input cascades, own noises of which substantially less, and the area of strengthening of such cascade considerably more. The area of strengthening depending on the different parameters of circuit is estimated.

Телевизионные методы широко используются в системах анализа изображений с целью извлечения полезной информации об изучаемых объектах или процессах. Важнейшим параметром является чувствительность этих систем [1-10]. Особенно это важно для видиконных камер [3,5]. Поэтому необходимое повышение чувствительности видеоусилителей является основополагающим.

Одним из способов повышения чувствительности систем является применение параметрических схем [11, 12]. В телевидении в малошумящих камерах типа видикон они применяются вместо вторичных электронных умножителей (ФЭУ) [3].

Однако в литературе не рассмотрен вопрос о применении параметрических видеоусилителей в малоемкостных датчиках (в том числе и в специальных видиконах) [13-15], что является важным.

Целью работы является исследование устройства со специальной связанной паразитной емкостью источника видеосигнала и с индуктивной схемой параметрического видеоусилителя. Исследованию подлежит амплитудно-частотная характеристика.

Функциональная схема параметрического видеоусилителя (ПВУ) представлена на рис. 1. Каскад содержит модулятор M , демодулятор D и генератор накачки G .

В общем случае ПВУ является нелинейным устройством. Анализ нелинейной схемы заключается в аппроксимации характеристик нелинейных элементов и в последующем расчете их электрических режимов, в нахождении формы токов и напряжений на них. Для этого из исходной схемы удаляются все малосигнальные источники и оставляется лишь блок генератора накачки. Расчет сводится к определению отклика нелинейной цепи на периодическое воздействие частоты накачки ν .

При расчете ПВУ иногда упрощают задачу, полагая, что напряжение или ток в нелинейном элементе является гармоническим колебанием частоты ν . Исходя из этого, определяют спектральный состав закона вариации параметра. Зачастую на практике подтверждается целесообразность такого подхода. После определения законов вариации параметров составляется малосигнальная схема замещения. Блок генератора накачки замещается его входным импедансом на комбинационных частотах. Источники смещения и нелинейные элементы замещаются линейными параметрическими моделями для мгновенных значений с уже известными законами вариации параметров.

При воздействии на вход ПВУ гармонического видеосигнала с частотой Ω происходит модуляция высокочастотного колебания накачки с частотой ν этим видеосигналом. На выходе M с помощью фильтра выделяются некоторые из образующихся комбинационных частот, чаще всего двух колебаний с частотами $\Omega+\nu$ и $\Omega-\nu$. С помощью демодулятора D из высокочастотных колебаний

получают напряжение видеосигнала $\dot{U}_{\text{вых}}$ с частотой Ω .

В настоящей статье исследуется схема ПВУ типа – балансный модулятор-амплитудный демодулятор (БМ-АД).

В [15] исследована схема балансного параметрического видеоусилителя (БПВУ), предназначенного для работы от передающей телевизионной трубки с большой (существенно больше 5-10 пФ) выходной емкостью. Однако в настоящей статье представлены результаты исследований другой оригинальной схемы БПВУ, перспективной при работе от малоемкостной (существенно меньше 5 пФ) видиконной трубки.

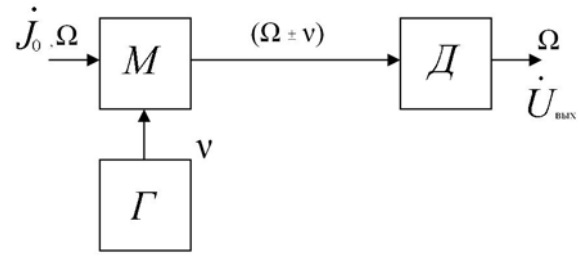


Рисунок 1 – Входной каскад ПВУ для передающей телевизионной камеры

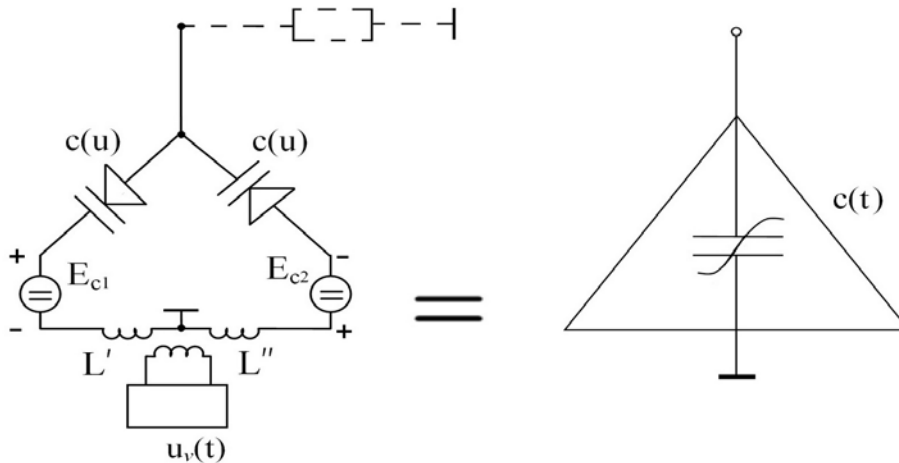


Рисунок 2 – Принципиальная схема емкостного моста (слева) и его обозначение (справа)

У этой схемы оригинальным является ее малая входная емкость, связанная с паразитной емкостью.

1. Балансный емкостный модулятор. Исследовались частотные характеристики (площадь усиления) и входное полное сопротивление БПВУ.

Схема емкостного моста, лежащего в основе БПВУ, представлена на рис. 2. Схема содержит два одинаковых варикапа $c(u)$, источники смещения E_{c1} и E_{c2} , генератор напряжения накачки $u_v(t)$, с помощью которого периодически изменяются емкости варикапов.

На варикапы напряжения накачки подаются через петли связи L' и L'' , влиянием которых на малосигнальные продукты БПВУ будем пренебрегать.

Тогда емкостный мост для малосигнальных колебаний эквивалентен параметрической емкости. В схеме замещения этот мост будем обозначать емкостью $c(t)$ с треугольником, как это показано на рис. 2.

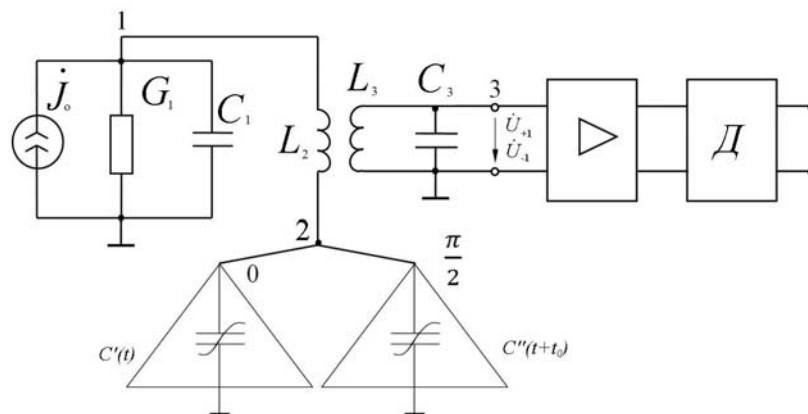


Рисунок 3 – Схема балансного параметрического видеоусилителя БПВУ

Анализируемая схема БПВУ представлена на рис. 3. Источник тока J_0 видеочастоты Ω и цепь C_1G_1 моделируют передающую телевизионную трубку с нагрузкой (так моделируется выходная цепь трубки). Индуктивность L_2 , общая емкость

$$c(t) = c'(t) + c''(t+t_0)$$

и емкость источника сигнала C_1 образуют высокочастотный контур, настроенный на частоту накачки. Второй контур образован цепью L_3C_3 . Оба контура связаны индуктивно.

На рис. 3 эквивалентные параметрические емкости $c'(t)$ и $c''(t+t_0)$ реализуются двумя балансными емкостными мостами, на которые напряжения накачки подаются от одного генератора, но со сдвигом по фазе на $\pi/2$, как это описано в [15]. Такое включение при идентичности емкостей позволяет компенсировать влияние второй гармоники суммарной параметрической емкости $c(t)$, что устраняет нежелательные регенеративные явления в БПВУ.

В рассматриваемой схеме использована двухконтурная резонансная схема, существенно влияющая на частотные характеристики БПВУ. Параметры резонансной системы выбирались так, чтобы общая проходная амплитудно-частотная характеристика имела двугорбый характер, как это показано на рис. 4.

Пусть параметрические емкости одинаковы, и накачка подается на мосты точно в квадратуре. Если законы вариации параметрических емкостей разложить в соответствующие ряды Фурье, учесть то, что вторая гармоника емкостей скомпенсирована, а также пренебречь действием остальных высших составляющих, то можно записать

$$c(t) = C_0 + 2C_1 \cos(vt+\varphi) = C_0 [1 + 2 \Gamma_1 \cos(vt+\varphi)] .$$

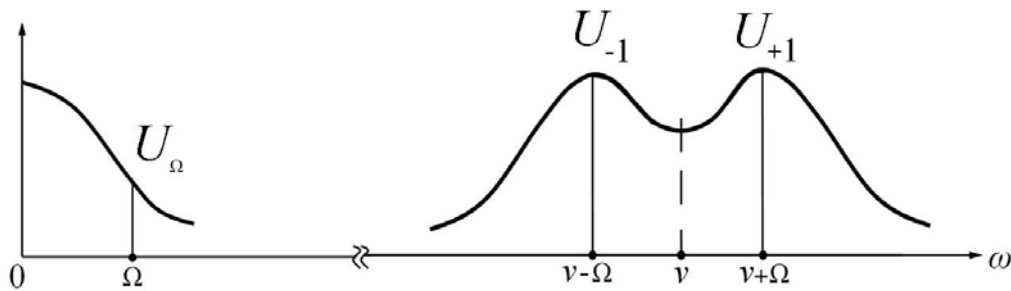


Рисунок 4 – Частотные характеристики входной части ПВУ и высокочастотного фильтра модулятора M

2. Схема замещения. Параметрическая схема замещения БПВУ показана на рис. 5.

Для нахождения стационарного режима используем метод замещения параметрических гармонических элементов зависимыми источниками по методу, изложенному в [16].

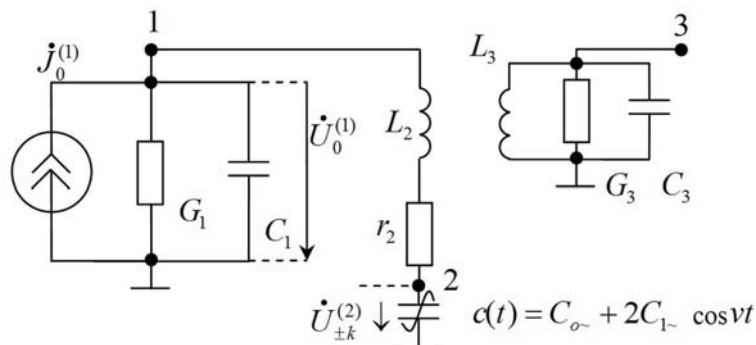


Рисунок 5 – Параметрическая схема замещения балансного модулятора

Гармонически изменяющуюся емкость $2C_1 \cos(vt+\varphi)$ заменяем эквивалентным бесконечным рядом зависимых генераторов тока, возбуждающих комбинационные колебания с частотами $\omega_{\pm k} = \Omega + kv$, где $k = 0, 1, 2, \dots$ с соответствующими амплитудами $J_{\pm k}$.

Пусть избирательные свойства схемы таковы, что целесообразно учитывать только суммарную и разностную комбинационные колебания, т. е. J_{+1} и J_{-1} . Тогда в схеме замещения число зависимых генераторов сократится до четырех: J_0, J_0', J_0'' и $J_{\pm 1}$.

Амплитуды токов генераторов имеют индексы, указывающие на частоты, которые они генерируют. Так индекс 0 указывает на колебание с частотой Ω , а индексы 1 соответствуют колебания с частотами $\omega_{+1} = \Omega + \nu$ и $\omega_{-1} = \Omega - \nu$. Полученная окончательно непараметрическая схема замещения показана на рис. 6.

Заменим в схеме рис. 5 параметрическую емкость $c(t)$ её непараметрической схемой замещения, представленной на рис. 6.

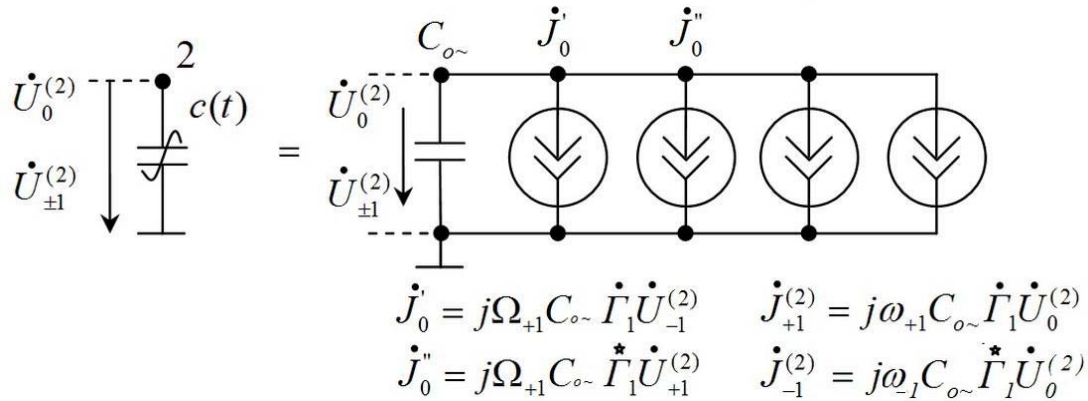


Рисунок 6 – Непараметрическая схема замещения параметрической гармонической емкости

Непараметрическую схему замещения преобразуем в эквивалентную схему для каждого из комбинационных колебаний [16].

Схема замещения для видеочастоты Ω представлена на рис. 7.

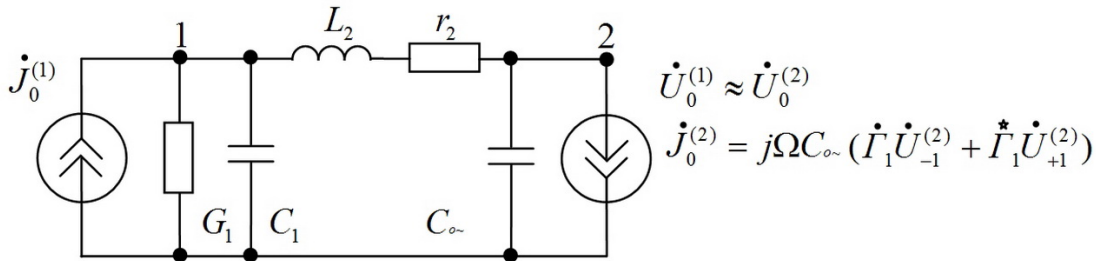


Рисунок 7 – Схема замещения на видеочастоте (полная модель)

Уравнения схемы рис. 7 имеют вид:

$$\begin{pmatrix} G_1 + j\Omega C_1 + \frac{1}{j\Omega L_2} & -\frac{1}{r_2 + j\Omega L_2} \\ -\frac{1}{r_2 + j\Omega L_2} & j\Omega C_{o\sim} + \frac{1}{j\Omega L_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_0^{(1)} \\ \dot{U}_0^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{J}_0^{(1)} \\ -\dot{J}_0^{(2)} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Влияние элементов L_2, r_2 незначительно (действительно $\Omega L_2 \rightarrow 0$ и r_2 мало). Воспользуемся упрощенной моделью, т.е. без L_2, r_2 . Если $|r_2 + j\Omega L_2| \rightarrow 0$, то $\dot{U}_0^{(1)} \approx \dot{U}_0^{(2)}$. И отсюда вытекает следующее.

Схема замещения на комбинационной частоте изображена на рис. 8.

$$Y_0^{(1)} \dot{U}_0 + j\Omega C_{0\sim} (\dot{\Gamma}_1 \dot{U}_{-1} + \dot{\Gamma}_1^* \dot{U}_{+1}) = \dot{J}_0^{(1)} \quad Y_0^{(1)} \dot{U}_0 + j\Omega C_{0\sim} (\dot{\Gamma}_1 \dot{U}_{-1} + \dot{\Gamma}_1^* \dot{U}_{+1}) = \dot{J}_0^{(1)} \quad (2)$$

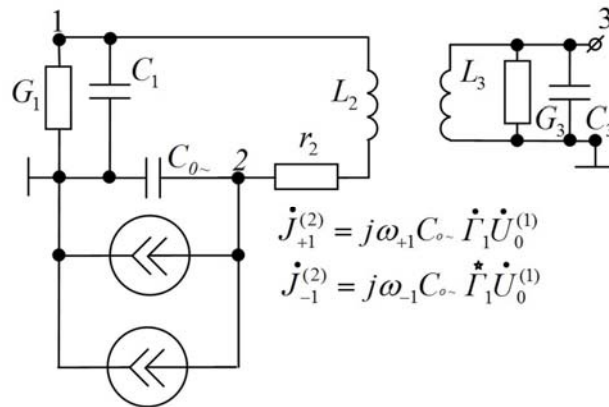


Рисунок 8 – Схема замещения на комбинационной частоте

Далее схему рис. 8 преобразуем в эквивалентную схему рис. 9.

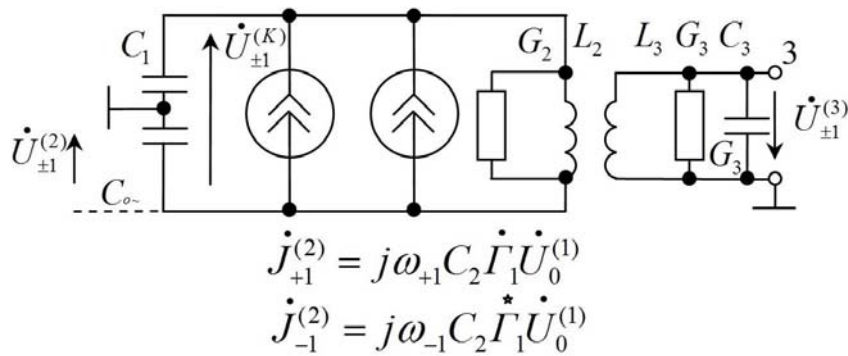


Рисунок 9 – Схема замещения для комбинационных частот после преобразования

Схема замещения для комбинационных частот $\omega_{\pm 1} = \Omega \pm \nu$ представлена рис. 9.

В окончательном виде вместо зависимых источников $\dot{J}_0^{(2)}$, $\dot{J}_{+1}^{(2)}$ и $\dot{J}_{-1}^{(2)}$ подставим их выражения. Тогда общая система уравнений запишется следующим образом:

$$\begin{pmatrix} Y_{-1}^{(k)} & j(\Omega - \nu) C_2 \dot{\Gamma}_1^* & 0 \\ j\Omega C_{0\sim} \dot{\Gamma}_1 p & Y_0^{(1)} & j\Omega C_{0\sim} \dot{\Gamma}_1 p \\ 0 & j(\Omega + \nu) C_2 \dot{\Gamma}_1 & \dot{Y}_{+1}^{(k)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_{-1}^{(k)} \\ \dot{U}_0^{(1)} \\ \dot{U}_{+1}^{(k)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{J}_0^{(1)} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Решение системы уравнений (3) дает выражение для сопротивления передачи. Сопротивление передачи на суммарной частоте равно

$$Z_{+1}^{(3)} = \frac{\dot{U}_{+1}^{(3)}}{\dot{J}_0^{(1)}} = \frac{\dot{U}_{+1}^{(k)}}{\dot{J}_0^{(1)}} \dot{T}_{+1} = \frac{j(\Omega + \nu) C_2 \dot{\Gamma}_1 Y_{-1}^{(k)} \dot{T}_{+1}}{Y_0^{(k)} Y_{-1}^{(k)} Y_{+1}^{(k)} - j(\Omega + \nu) C_2 j\Omega C_2 \dot{\Gamma}_1 \dot{\Gamma}_1^* Y_{-1}^{(k)} - j(\Omega - \nu) C_2 \dot{\Gamma}_1 \dot{\Gamma}_1^* Y_{+1}^{(k)}} \quad (4)$$

Сопротивление передачи на разностной частоте равно

$$Z_{-1}^{(3)} = \frac{U_{-1}^{(3)}}{J_0^{(1)}} = \frac{U_{-1}^{(k)}}{J_0^{(1)}} \dot{T}_{-1} = \frac{j(\Omega - \nu) C_2 \dot{\Gamma}_1 Y_1^{(k)} \dot{T}_{-1}}{Y_0^{(k)} Y_{-1}^{(k)} Y_{+1}^{(k)} - j(\Omega + \nu) C_2 j \Omega C_2 \dot{\Gamma}_1 \dot{\Gamma}_1 Y_{-1}^{(k)} - j(\Omega - \nu) C_2 \dot{\Gamma}_1 \dot{\Gamma}_1 Y_{+1}^{(k)}} \quad (5)$$

Сопротивление передачи при симметрии амплитудно-частотной характеристики равно

$$Z_{\pm 1}^{(3)} = \frac{j(\Omega \pm \nu) C_2 \dot{\Gamma}_1 T}{Y_0^{(1)} Y_{\pm 1}^{(k)} + 2\Omega^2 C_2^2 \dot{\Gamma}_1^2} \quad (6)$$

При условии симметричности

$$Y_{\pm}^{(k)} = G_2 \left(1 + j\alpha + \frac{\beta^2}{1 + j\alpha} \right), \quad Y_0^{(1)} = G_1 + j\Omega(C_0 + C_1),$$

$$\dot{T} = T(\alpha) = \frac{\beta}{(1 + j\alpha)^2 + \beta^2},$$

$$\dot{T}(\omega_{+1}) = \dot{T}^*(\omega_{-1}) = \dot{T}, \quad \alpha = \frac{2\Omega}{\nu} Q,$$

$$G_2 = \frac{C_1 C_{0\sim}}{C_1 + C_{0\sim}}, \quad \dot{\Gamma}_1 = \dot{\Gamma}_1^* = \dot{\Gamma}_1.$$

Исследуем важный случай, когда оба контура двухконтурной резонансной системы одинаковы и настроены точно на частоту накачки. Полученное при этом сопротивление передачи представлено в (6) с соответствующими обозначениями.

3. Частотные характеристики сопротивления передачи модулятора. По формуле (6) исследовано сопротивление передачи модулятора на суммарной частоте $Z_{+1}^{(3)}$. Амплитудно-частотная (АЧХ) $|Z_{+1}^{(3)}|$ и фазочастотная характеристики (ФЧХ) $\arg Z_{+1}^{(3)}$ рассчитаны при следующих значениях параметров:

$$\nu = 2\pi 300 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}, \quad C_{0\sim} = C_1 = 9 \text{ пФ}, \quad G_1 = 0,333 \cdot 10^{-6} \text{ См}, \quad p = 2.$$

В качестве примера на рис. 10,а приведены АЧХ сопротивления передачи модулятора при различных значениях коэффициента связи β и указанных значениях коэффициента вариации параметрической емкости Γ_1 и добротности Q .

Изучение АЧХ, полученных при различных значениях параметров β , Γ_1 , Q , позволяет сделать вывод, что увеличение параметра Γ_1 приводит к увеличению сопротивления передачи во всей полосе видеочастот. Увеличение параметра β и уменьшение добротности Q расширяет полосу пропускания, но при этом снижается величина сопротивления передачи.

Изучение ФЧХ (рис. 10,б) показывает, что в целом фазовые характеристики носят более линейный характер, чем непараметрические схемы.

4. Сравнение амплитудно-частотных характеристик БПВУ и схемы противошумовой коррекции. Для оценки частотных свойств БПВУ, представленного на рис. 3, примем, что передаточная функция усилительно-детекторной части постоянна во всей полосе усиливаемых и преобразуемых частот и равна 1. Тогда сопротивление передачи БПВУ запишется

$$Z_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} / J_0^{(1)} = Z_{+1} + Z_{-1}.$$

По этой формуле рассчитаны АЧХ БПВУ при следующих значениях параметров:

$$\Gamma_1 = 0,325 \text{ и } Q = 70.$$

Остальные параметры такие же, как и в предыдущем разделе.

На рис.11 представлена для сравнения схема противошумовой коррекции [18].

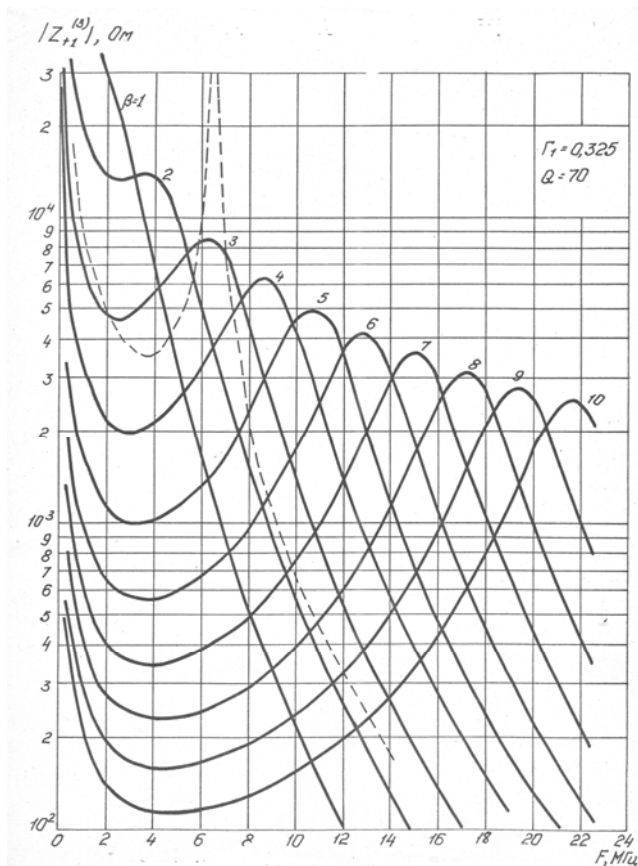
На рис. 10,а представлена её АЧХ пунктиром при соответствующих значениях параметров:

$$G_1 = 0,333 \cdot 10^{-6} \text{ См}, \quad C_1 = C_2 = 9 \text{ пФ}, \quad L = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}, \quad r = 100 \text{ Ом}.$$

На рис. 10,б для неё же представлена пунктиром ФЧХ.

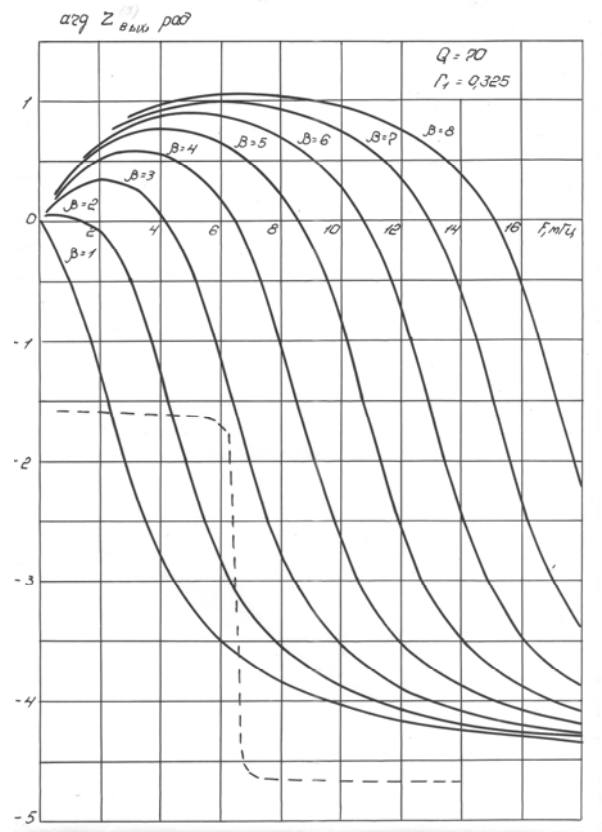
Сравнение АЧХ показывает, что параметрическая схема обладает существенно большей площадью усиления, чем схема противошумовой коррекции. Это важно при построении малошумящих видеоусилителей и соответственно для повышения чувствительности телевизионных систем.

Сравнение ФЧХ показывает, что параметрическая схема обладает существенно большей линейностью.



а)

Рисунок 10,а – Амплитудно-частотные характеристики БПВУ при различных значениях β



б)

Рисунок 10,б – ФЧХ двухконтурного БПВУ. Влияние коэффициента связи β

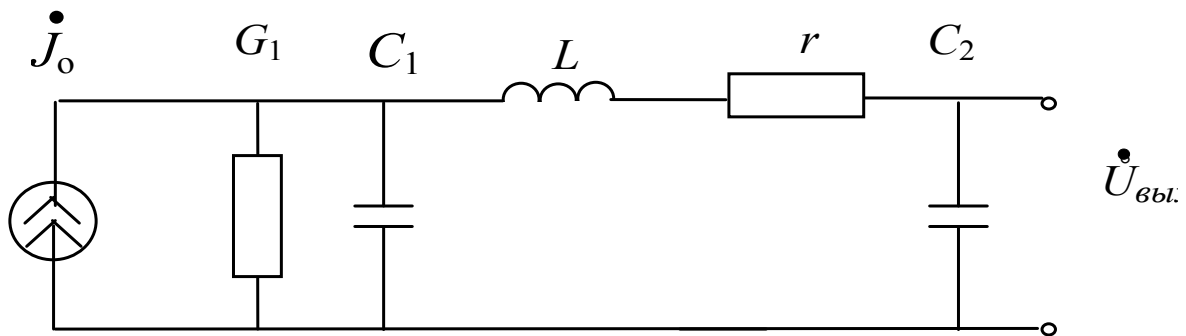


Рисунок 11 – Схема противозумовой коррекции

5. Исследование входного полного сопротивления БПВУ. Важной характеристикой БПВУ является его входное полное сопротивление. БПВУ работает от передающей телевизионной трубки, моделируемой источником тока, поэтому желательно повышение входного полного сопротивления видеоусилителя во всей полосе усиливаемых частот.

Из соотношений (6) получается следующее выражение для общей входной комплексной проводимости БПВУ совместно с выходной комплексной проводимостью источника $G_1 C_1$:

$$Y_{\text{вх}}^{(1)} = \frac{\dot{U}_0^{(1)}}{\dot{J}_0^{(1)}} = \dot{Y}_0^{(1)} + \frac{2(\Omega C_2 \Gamma_1)^2}{\dot{Y}_1^{(2)}}$$

или

$$\dot{Y}_{\text{вх}}^{(1)} = \dot{Y}_0^{(1)} + \dot{Y}_{\text{вх.мод.}}^{(1)},$$

где

$$\dot{Y}_0^{(1)} = G_1 + j\Omega(C_1 + C_{0-}).$$

Входная полная проводимость модулятора

$$\dot{Y}_{\text{вх.мод.}}^{(1)} = \dot{Y}_{\text{вх}}^{(1)} - \dot{Y}_0^{(1)} = \frac{2(\Omega C_2 \Gamma_1)^2}{\dot{Y}_1^{(2)}} = G_{\text{вх.мод.}} + j\Omega C_{\text{вх.мод.}}$$

содержит резистивную проводимость $G_{\text{вх.мод.}}$ и емкостную составляющую $C_{\text{вх.мод.}}$.

Графики составляющих входной дополнительной емкости $C_{\text{вх.мод.}}$ и комплексной входной проводимости $G_{\text{вх.мод.}}$ при различных значениях параметров представлены на рис. 12 и 13.

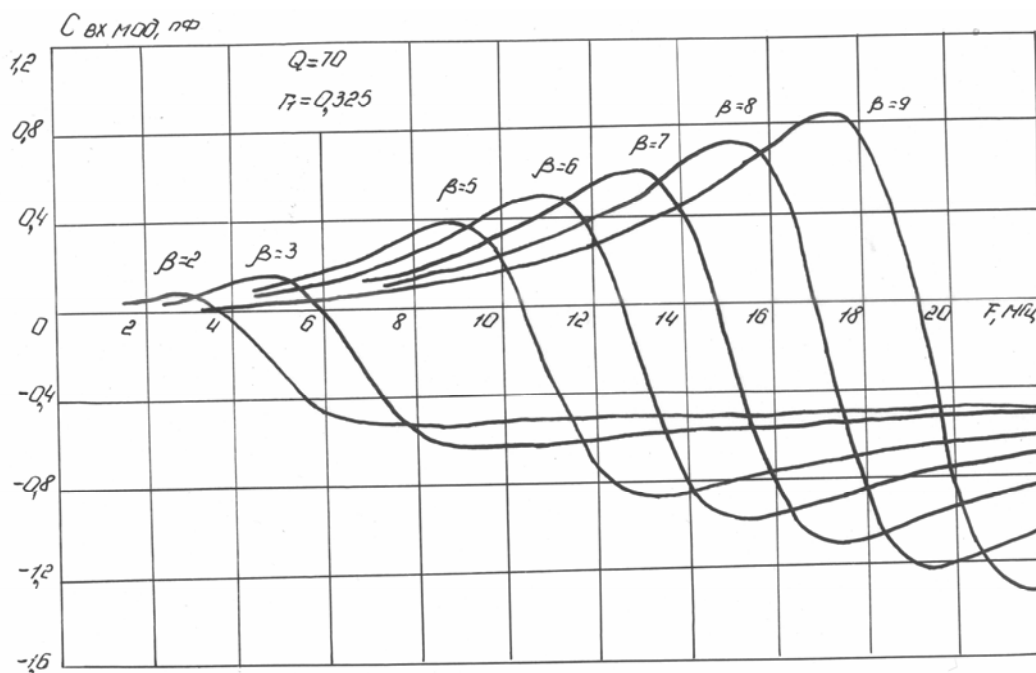


Рисунок 12 – Входная дополнительная емкость БПВУ. Зависимость при разных β

Исследование графиков показывает, что при уменьшении добротности Q с увеличением полосы пропускания увеличивается и входная резистивная проводимость и в большей полосе входная дополнительная емкость имеет положительный знак. Увеличение коэффициента вариации емкости Γ_1 пропорционально увеличивает во всей полосе частот составляющие входной резистивной проводимости $G_{\text{вх.мод.}}$ и $C_{\text{вх.мод.}}$. При увеличении значения параметра связи β наряду с расширением полосы усиливаемых частот увеличивается и входная резистивная проводимость.

Входная полная проводимость модулятора БПВУ мала на низких частотах и увеличивается в области верхних частот. При расширении полосы пропускания также увеличивается входная проводимость.

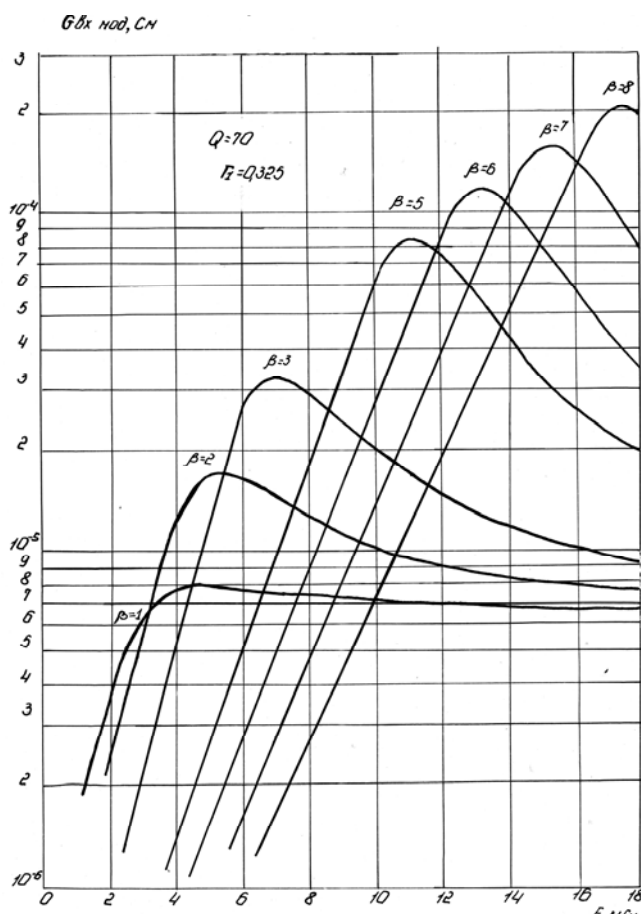


Рисунок 13 – Входная проводимость БВУ. Зависимость при различных значениях β

В заключение сделаем выводы.

Главная часть статьи посвящена получению амплитудно-частотной характеристики БВУ.

Параметрический видеоусилитель с двухконтурным балансным модулятором, выполненным по схеме с компенсацией второй гармоники вариации параметрической емкости, имеет улучшенные технические характеристики: большее сопротивление передачи в широкой полосе усиливаемых частот. Этот технический показатель зависит от правильного выбора параметров схемы. Наличие второго контура позволяет выполнить эффективную коррекцию АЧХ на верхних видеочастотах и тем самым улучшить чувствительность всей схемы.

Литература

1. Крыжановский В.Д. Телевидение цветное и черно-белое / В.Д. Крыжановский, Ю.В. Костыков – М.: Связь, 1980. – 336 с.
2. Быков Р.Е. Теоретические основы телевидения: [учебник для вузов] / Быков Р. Е. – СПб.: Изд-во «Лань», 1998. – 288 с.
3. Быков Р.Е. Анализ и обработка цветных и объемных изображений / Р.Е. Быков, С.Б. Гуревич – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
4. Рабышко В. А. Пириконы. / В.А. Рабышко, Л. З. Криксунов – К.: Техніка, 1984. – 80 с.
5. Улучшение чувствительности широкополосных камер / [М.Ф. Брацлавец, А.М. Минкин, В.И. Ресин та ін.] // Техника кино и телевидения. – 1974. – N 4. – С. 38-42.
6. Козелкин В.В. Основы инфракрасной техники: [учебник для техникумов] / В.В. Козелкин, И.Ф. Усольцев. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
7. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники / Криксунов Л.З. – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с.
8. Справочник по приемникам оптического излучения / [В.А. Волков, В.К. Вялов, Л.Г. Гассанов и др.]; под ред. Л.З. Криксунова и Л.С. Кременчугского. – К.: Техніка, 1985. – 216 с.
9. Барсуков Ф.И. Телевизионные системы летательных аппаратов: учеб. пособие для вузов / Барсуков Ф.И., Величкин А.И., Сухарев А.Д. – М.: Сов. радио, 1979. – 256 с.

10. Богородский Ю.Л. Разрешающая способность систем магнитной записи / Богородский Ю.Л. – М.: Энергия, 1980. – 112 с.
11. Бобров П.П. Анализ характеристик балансных параметрических усилителей в режиме без постоянного смещения на полупроводниковом диоде / П.П. Бобров, Ф.М. Порошин / В сб.: Радиофизика и исследование свойств вещества. – Омск: ОмГПедИ, 1978. – С. 40-44.
12. Бобров П.П. Использование двух варакторных диодов, выполненных на одной подложке, в балансных схемах параметрических усилителей / Бобров П.П., Ковалев В.П., Ровкин В.И. / В сб.: Радиофизика и исследование свойств вещества. – Омск: ОмГПедИ, 1978. – С.45-48.
13. А. с. N 642796, СССР. Передающая телевизионная трубка / В.А. Арбузников, В.Н. Бельдюгин и др.; заявл. 1.08.77; зарегистр. 21.09.78.;опубл. 15.01.79. Бюл. изобр. N 2.
14. Арбузников В.А. Параметрический видеоусилитель / В. А. Арбузников, В. Н. Бельдюгин // Техника кино и телевидения. – 1967. – N 5. – С. 57-60.
15. Арбузников В.А. Параметрический балансный видеоусилитель / В.А. Арбузников, В.Н. Бельдюгин, А. Ф. Ракоед // Вопросы электросвязи, 1969. – С. 35-42.
16. Арбузников В. А. Непараметрические схемы замещения параметрических двухполюсников: алгебраические и иммитансные F -модели / В. А. Арбузников, Ю.В. Варава, Л. И. Платонова // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2003. – № 2. – С. 28 – 36.
17. Арбузников В. А. Автоматическое проектирование алгебраических цепей. Определения / В.А. Арбузников, Ю. В. Варава // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2002. – № 3. – С. 6 –19.
18. Брауде Г. В. Коррекция телевизионных и импульсных сигналов / Брауде Г.В. – М.: Связь, 1967. – 246 с.