

УДК 621.373.5

А.С. Богданов, В.П. Лищишин

## ЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА РЕЗОНАНСНОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА С РАЗДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

*Рассматриваются частотные свойства резонансного усилительного каскада с разделенной нагрузкой. Показано, что рабочая полоса пропускания такого каскада может ограничиваться не только значением коэффициента передачи по мощности, но и значением коэффициента устойчивости, которое на краях рабочей полосы частот должно оставаться в допустимых пределах. Предложен подход к построению схем каскадов резонансных усилителей мощности с разделенной нагрузкой, позволяющий получать более равномерные частотные зависимости коэффициентов устойчивости в допустимом диапазоне изменения их значений.*

**Введение.** В литературе описаны стабильные по частоте транзисторные автогенераторы повышенной и большой мощности [1, 2, 3]. Подобные автогенераторы выполняются на сложных активных приборах (САП), построенных по принципу составного транзистора (СТ) или высокочастотного СТ (ВЧ СТ). Схема последнего включает в себя цепь коррекции (рисунок 1). При работе в диапазоне частот СТ как сложный активный прибор, состоящий, например, из двух разных по номинальной мощности и близких по частотным свойствам транзисторов, проявляет ряд специфических свойств, изучение которых необходимо для результативного использования СТ и ВЧ СТ в перестраиваемых по частоте автогенераторных каскадах.

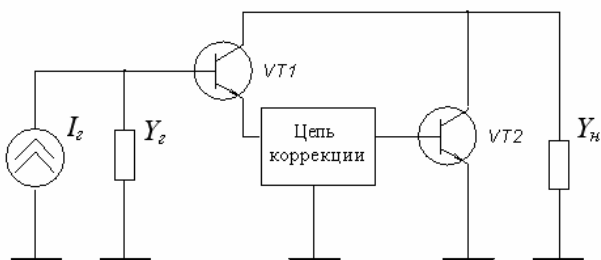


Рисунок 1 – Эквивалентная схема по переменному току усилительного каскада на ВЧ СТ

САП типа СТ удобно анализировать, разделив его условно на две составляющих части:

- выходной каскад, выполненный по схеме с общим эмиттером (ОЭ). При этом пренебрегаем влиянием маломощного транзистора  $VT1$  по коллекторной цепи на мощный транзистор  $VT2$ ;
- каскад на транзисторе  $VT1$ , нагруженный как по коллекторной, так и по эмиттерной цепям

и называемый поэтому каскадом с разделенной нагрузкой (РН) (рисунок 2).

Частотные свойства выходного каскада на транзисторе  $VT2$  связи СТ рассмотрены в [4].

### Цели настоящей работы:

- провести анализ параметров резонансного усилительного каскада с РН, работающего в частотном диапазоне, равном его полосе пропускания, полагая при этом, что для согласования иммитанса генератора сигнала с входной проводимостью транзистора, а также иммитансов коллекторной и эмиттерной частей нагрузки с соответствующими выходными проводимостями транзистора используются электрические цепи в виде низкочастотных колебательных контуров;

- по результатам анализа составить схему каскада с РН, позволяющую получить более равномерные частотные зависимости коэффициентов устойчивости в допустимом диапазоне изменения их значений и пригодную для построения автогенераторных каскадов на САП типа СТ.

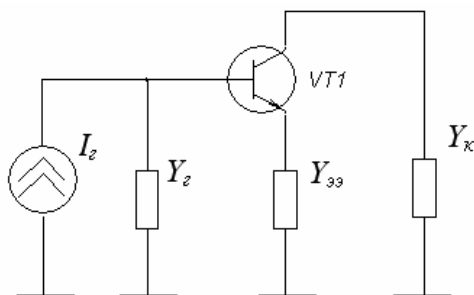


Рисунок 2 – Эквивалентная схема по переменному току каскада с РН

**Теоретические исследования.** Рассмотрим условия работы входного транзистора  $VT1$  структуры СТ в генераторном каскаде (рису-

нок 1). В качестве коллекторной части нагрузки транзистора  $VT1$   $Y_{кэ}$  выступает кажущаяся проводимость общей для обоих транзисторов нагрузки каскада  $Y_n$ , а в качестве эмиттерной части нагрузки  $Y_{ээ}$  – входная проводимость транзистора  $VT2$   $Y_{вх.VT2}$ , приведенная к эмиттеру первого транзистора  $VT1$  цепью коррекции. Резонансный усилительный каскад с РН (рисунок 2) может быть сведен [5] к эквивалентному ему каскаду с общим коллектором (ОК) или эквивалентному ему каскаду с ОЭ путем пересчета  $Y$ -параметров транзистора  $VT1$  в  $Y$ -параметры, учитывающие проводимость в цепи общего электрода  $Y_{кэ}$  или  $Y_{ээ}$  соответственно [6].

Оценка усилительных свойств транзистора в каскадах с ОЭ и ОК приведена в [7]. Каскад, собранный по схеме с ОЭ, значительно превосходит по усилительным свойствам каскад, собранный на том же транзисторе по схеме с ОК. Отметим, что коэффициент внутренней устойчивости транзистора в каскаде с ОК меньше единицы во всем диапазоне рабочих частот.

Учитывая это, целесообразно в первую очередь обеспечить в каскаде с РН такой режим работы, при котором в эмиттерную часть нагрузки  $Y_{ээ}$  отдается максимально возможная мощность, поступающая для возбуждения мощного выходного транзистора  $VT2$  структуры составного.

Методика расчета каскада с РН в линейном режиме приведена в [8]. Пусть заранее рассчитаны элементы матрицы проводимостей транзистора  $VT1$ , включенного по схеме с ОЭ, при токе коллектора в рабочей точке  $I_{к0}$ :

$$\|Y^{оэ}\| = \begin{vmatrix} Y_{11}^{оэ} & Y_{12}^{оэ} \\ Y_{21}^{оэ} & Y_{22}^{оэ} \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Используя (1), находим матрицу проводимостей того же транзистора, включенного по схеме с ОК с тем же значением тока в рабочей точке:

$$\|Y^{ок}\| = \begin{vmatrix} Y_{11}^{ок} & Y_{12}^{ок} \\ Y_{21}^{ок} & Y_{22}^{ок} \end{vmatrix}, \quad (2)$$

$$\text{где } Y_{11}^{ок} = Y_{11}^{оэ}; \quad Y_{12}^{ок} = -Y_{11}^{оэ} - Y_{12}^{оэ};$$

$$Y_{21}^{ок} = -Y_{11}^{оэ} - Y_{21}^{оэ}; \quad Y_{22}^{ок} = Y_{11}^{оэ} + Y_{12}^{оэ} + Y_{21}^{оэ} + Y_{22}^{оэ}.$$

Для определения значения проводимости  $Y_{ээ}$  (рисунок 2), оптимальной с точки зрения лучшей передачи мощности в эквивалентном каскаде с ОК при коэффициенте устойчивости последнего  $K^{кэ}_y$ , необходимо задать начальное значение кажущейся проводимости коллекторной части нагрузки  $Y_{кэ} = G_{кэ} + jB_{кэ}$ .

Сведем каскад с РН (рисунок 2) к эквивалентному ему каскаду с ОК заменой  $Y$ -параметров транзистора  $VT1$  из матрицы (2) на  $Y$ -параметры, учитывающие проводимость  $Y_{кэ}$  в цепи общего электрода (коллектора) [6]:

$$\|Y^{кэ}\| = \begin{vmatrix} Y_{11}^{кэ} & Y_{12}^{кэ} \\ Y_{21}^{кэ} & Y_{22}^{кэ} \end{vmatrix}, \quad \text{где} \quad (3)$$

$$Y_{11(22)}^{кэ} = \frac{Y_{11(22)}^{ок} + Z_{кэ} \cdot \Delta Y}{1 + Y_{22}^{оэ} \cdot Z_{кэ}}, \quad Y_{12(21)}^{кэ} = \frac{Y_{12(21)}^{ок} - Z_{кэ} \cdot \Delta Y}{1 + Y_{22}^{оэ} \cdot Z_{кэ}},$$

$$Z_{кэ} = 1/Y_{кэ}, \quad \Delta Y = Y_{11}^{оэ} \cdot Y_{22}^{оэ} - Y_{12}^{оэ} \cdot Y_{21}^{оэ} - \text{определитель матрицы (1)}.$$

При вычисленных значениях элементов матрицы (3) возможно оптимизировать каскад с ОК, нагруженный по входу на проводимость генератора  $Y_g$ , а по выходу – на проводимость  $Y_{ээ}$ , для получения максимального номинального коэффициента усиления мощности  $K_{p.ээ.н}$  при заданном коэффициенте устойчивости  $K^{кэ}_y$  по методике, приведенной в [7].

Согласно этой методике сначала рассчитывается коэффициент внутренней устойчивости каскада с ОК:

$$K_{y.вн}^{кэ} = \frac{2 \cdot \text{Re}[Y_{11}^{кэ}] \cdot \text{Re}[Y_{22}^{кэ}] - \text{Re}[Y_{12}^{кэ} \cdot Y_{21}^{кэ}]}{|Y_{12}^{кэ} \cdot Y_{21}^{кэ}|}.$$

Далее определяются проводимости  $Y_g, Y_{ээ}$ :

$$\text{Re}[Y_g] = \text{Re}[Y_{11}^{кэ}] \cdot \left( \sqrt{(K_y^{кэ} + \cos \psi) / (K_{y.вн}^{кэ} + \cos \psi)} - 1 \right), \quad (4)$$

$$\text{Re}[Y_{ээ}] = \text{Re}[Y_{22}^{кэ}] \cdot \left( \sqrt{(K_y^{кэ} + \cos \psi) / (K_{y.вн}^{кэ} + \cos \psi)} - 1 \right),$$

$$\text{Im}[Y_g] = \sigma_0 \cdot \left( \text{Re}[Y_g] + \text{Re}[Y_{11}^{кэ}] \right) - \text{Im}[Y_{11}^{кэ}], \quad (5)$$

$$\text{Im}[Y_{ээ}] = \sigma_0 \cdot \left( \text{Re}[Y_{ээ}] + \text{Re}[Y_{22}^{кэ}] \right) - \text{Im}[Y_{22}^{кэ}],$$

где  $\sigma_0$  – действительный корень кубического уравнения

$$\sigma^3 + \left( 1 + \frac{2 \cdot \cos \psi}{K_y^{кэ} + \cos \psi} \right) \cdot \sigma - \frac{2 \cdot \sin \psi}{K_y^{кэ} + \cos \psi} = 0,$$

$$\cos \psi = \frac{\text{Re}[Y_{12}^{кэ} \cdot Y_{21}^{кэ}]}{|Y_{12}^{кэ} \cdot Y_{21}^{кэ}|}, \quad \sin \psi = \frac{\text{Im}[Y_{12}^{кэ} \cdot Y_{21}^{кэ}]}{|Y_{12}^{кэ} \cdot Y_{21}^{кэ}|}.$$

При расчете проводимостей  $Y_g$  и  $Y_{ээ}$  по формулам (4) и (5) гарантируется максимально возможный (при заданной устойчивости эквивалентного каскада с ОК) номинальный коэффициент передачи мощности в эмиттерную часть нагрузки каскада с РН:

$$K_{p.ээ.н} = \frac{4 \cdot |Y_{12}^{кэ}|^2 \cdot \text{Re}[Y_g] \cdot \text{Re}[Y_{ээ}]}{\left| (Y_{11}^{кэ} + Y_g) \cdot (Y_{22}^{кэ} + Y_{ээ}) - Y_{12}^{кэ} \cdot Y_{21}^{кэ} \right|^2}.$$

Теперь, когда оптимизирована цепь эмиттера рассчитываемого каскада, заменим каскад с РН эквивалентным ему каскадом с ОЭ, для чего учтем действие найденной ранее проводимости  $Y_{\Sigma}$ , находящейся в цепи общего электрода (эмиттера) транзистора  $VTI$ .

Пересчет  $Y$ -параметров проводится согласно методике, изложенной в [6]:

$$\|Y^{33}\| = \begin{vmatrix} Y_{11}^{33} & Y_{12}^{33} \\ Y_{21}^{33} & Y_{22}^{33} \end{vmatrix}, \text{ где} \quad (6)$$

$$Y_{11(22)}^{33} = \frac{Y_{11(22)}^{03} + Z_{33} \cdot \Delta Y}{1 + Y_{22}^{03} \cdot Z_{33}}, \quad Y_{12(21)}^{33} = \frac{Y_{12(21)}^{03} - Z_{33} \cdot \Delta Y}{1 + Y_{22}^{03} \cdot Z_{33}},$$

$$Z_{33} = 1/Y_{33}.$$

Используя  $Y$ -параметры из матрицы (6), определяем характеристики каскада с ОЭ:

- входную и выходную по цепи коллектора проводимости эквивалентного каскада с ОЭ:

$$Y_{\text{вх}} = Y_{11}^{33} - \frac{Y_{12}^{33} \cdot Y_{21}^{33}}{Y_{22}^{33} + Y_{\text{кэ}}}; \quad Y_{\text{вых}} = Y_{22}^{33} - \frac{Y_{12}^{33} \cdot Y_{21}^{33}}{Y_{11}^{33} + Y_{\Sigma}};$$

- номинальный коэффициент передачи мощности эквивалентного каскада с ОЭ (в каскаде с РН – в коллекторную часть нагрузки):

$$K_{p, \text{кэ.н}} = \frac{4 \cdot |Y_{12}^{33}|^2 \cdot \text{Re}[Y_{\Sigma}] \cdot \text{Re}[Y_{\text{кэ}}]}{\left| (Y_{11}^{33} + Y_{\Sigma}) \cdot (Y_{22}^{33} + Y_{\text{кэ}}) - Y_{12}^{33} \cdot Y_{21}^{33} \right|^2};$$

- коэффициент устойчивости эквивалентного каскада с ОЭ:

$$K_y^{33} = \frac{2 \cdot \text{Re}[Y_{\Sigma} + Y_{11}^{33}] \cdot \text{Re}[Y_{\text{кэ}} + Y_{22}^{33}] - \text{Re}[Y_{12}^{33} \cdot Y_{21}^{33}]}{|Y_{12}^{33} \cdot Y_{21}^{33}|}$$

Для коллекторной цепи каскада с РН условие комплексного согласования будет выполнено, если нулю будет равна сумма проводимостей  $B_{\Sigma}^{33}$  и  $B_{\text{кэ}}$ , то есть:

$$B_{\Sigma} = \text{Im}[Y_{\text{вых}}^{33}] + \text{Im}[Y_{\text{кэ}}]. \quad (7)$$

Из (7) следует, что свести к нулю значение  $B_{\Sigma}$  можно, задав некоторое отрицательное значение проводимости  $\text{Im}[Y_{\text{кэ}}]$ , так как выходная проводимость каскада с ОЭ носит в рассматриваемом диапазоне частот емкостный характер и поэтому положительна. Очевидно, что, задав интервал значений проводимости  $\text{Im}[Y_{\text{кэ}}]$  таким, чтобы функция  $B_{\Sigma}$  на этом интервале принимала значение, равное нулю, можно определить оптимальную величину проводимости  $\text{Im}[Y_{\text{кэ}}]$ . Решается эта задача, например, методом половинного деления. При  $B_{\Sigma}=0$  найденные значения  $Y_{\Sigma}$ ,  $Y_{\text{э}}$ ,  $Y_{\text{кэ}}$  устанавливаются в каскаде с РН (рисунок 2) такой режим по переменному току, при котором условие согласования по мнимым частям проводимостей выполняется в каждой части схемы:

а) реактивная составляющая проводимости генератора сигнала  $\text{Im}[Y_{\Sigma}]$  равна по модулю и противоположна по знаку реактивной составляющей входной проводимости каскада с РН;

б) реактивная составляющая проводимости  $Y_{\text{э}}$  равна по модулю и противоположна по знаку реактивной составляющей выходной проводимости транзистора  $VTI$  по цепи эмиттера;

в) реактивная составляющая проводимости  $Y_{\text{кэ}}$  равна по модулю и противоположна по знаку реактивной составляющей выходной проводимости транзистора  $VTI$  по цепи коллектора.

Условия (а) и (б) выполняются в силу расчета проводимостей  $Y_{\Sigma}$  и  $Y_{\text{э}}$  по формулам (5), а условие (в) – за счет реализации равенства  $B_{\Sigma}=0$ .

После определения проводимостей  $Y_{\Sigma}$ ,  $Y_{\text{э}}$ ,  $Y_{\text{кэ}}$  переходим к расчету энергетических характеристик каскада с РН на транзисторе  $VTI$  на резонансной частоте.

Матрице  $Y$ -параметров (6) соответствует система уравнений, характеризующая эквивалентный каскад по схеме с ОЭ:

$$\begin{cases} \dot{I}_B = Y_{11}^{33} \cdot \dot{U}_{\text{вх}} + Y_{12}^{33} \cdot \dot{U}_{\text{вых}}^{33} \\ \dot{I}_K = Y_{21}^{33} \cdot \dot{U}_{\text{вх}} + Y_{22}^{33} \cdot \dot{U}_{\text{вых}}^{33} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{Из (8) найдем } \dot{U}_{\text{вых}}^{33} = (I_B - Y_{11}^{33} \cdot \dot{U}_{\text{вх}}) / Y_{12}^{33}$$

и, учитывая, что  $\dot{I}_B = \dot{U}_{\text{вх}} \cdot Y_{\Sigma}$ , получим

$$\dot{U}_{\text{вых}}^{33} = \dot{U}_{\text{вх}} \cdot (Y_{\Sigma} - Y_{11}^{33}) / Y_{12}^{33}. \quad (10)$$

После подстановки (10) в (9) имеем:

$$\dot{I}_K = \dot{U}_{\text{вх}} \cdot \left[ Y_{21}^{33} + \frac{Y_{22}^{33} \cdot (Y_{\Sigma} - Y_{11}^{33})}{Y_{12}^{33}} \right]$$

$$\text{или } \dot{I}_K = \dot{U}_{\text{вх}} \cdot (Y_{22}^{33} \cdot Y_{\Sigma} - \Delta Y^{33}) / Y_{12}^{33}, \quad (11)$$

где  $\Delta Y^{33} = Y_{11}^{33} \cdot Y_{22}^{33} - Y_{12}^{33} \cdot Y_{21}^{33}$  - определитель матрицы (6).

При работе транзистора  $VTI$  в линейном режиме исходные  $Y$ -параметры (1) рассчитываются при заданном постоянном токе коллектора, как предложено в [7]. Режим колебаний первого рода при полигональной аппроксимации вольт-амперной характеристики транзистора будет иметь место до тех пор, пока амплитуда первой гармоники коллекторного тока не превысит значение постоянной составляющей тока коллектора, то есть  $|I_k| \leq I_{k0}$ . Приняв граничное условие, из (11) получим

$$I_{k0} = |U_{\text{вх}}| \cdot \left| \frac{Y_{22}^{33} \cdot Y_{\Sigma} - \Delta Y^{33}}{Y_{12}^{33}} \right|,$$

откуда найдем максимальную амплитуду сигнала возбуждения

$$U_{ex} = I_{k0} \cdot \left| \frac{Y_{12}^{ээ}}{Y_{22}^{ээ} \cdot Y_{ex} - \Delta Y^{ээ}} \right|. \quad (12)$$

После определения амплитуды напряжения возбуждения по формуле (12), принимая за опорный вектор  $\dot{U}_{ex}$ , находим:

- ток базы транзистора  $VTI$   $\dot{I}_B = \dot{U}_{ex} \cdot Y_{ex}$  ;

- выходное напряжение на коллекторной части нагрузки из (10)

$$\dot{U}_{вых}^{ээ} = \dot{U}_{ex} \cdot (Y_{ex} - Y_{11}^{ээ}) / Y_{12}^{ээ} ;$$

- ток коллектора транзистора  $VTI$  из (9)

$$\dot{I}_K = Y_{21}^{ээ} \cdot \dot{U}_{ex} + Y_{22}^{ээ} \cdot \dot{U}_{вых}^{ээ} ;$$

- ток эмиттера транзистора  $VTI$   $\dot{I}_э = \dot{I}_B + \dot{I}_K$  ;

- выходное напряжение на эмиттерной части нагрузки каскада  $\dot{U}_{вых}^{кэ} = \dot{I}_э / Y_{ээ}$  ;

- падение высокочастотного напряжения на транзисторе  $VTI$  (рисунок 2)  $\dot{U}_{кэ} = \dot{U}_{вых}^{кэ} - \dot{U}_{вых}^{ээ}$  ;

- мощность, отдаваемую каскадом с РН в коллекторную часть нагрузки,

$$P_{кэ} = 0,5 \cdot |U_{вых}^{кэ}|^2 \cdot \text{Re}[Y_{кэ}];$$

- мощность, отдаваемую каскадом с РН в эмиттерную часть нагрузки,

$$P_{ээ} = 0,5 \cdot |U_{вых}^{ээ}|^2 \cdot \text{Re}[Y_{ээ}];$$

- мощность возбуждения каскада с РН

$$P_z = P_{ээ} / K_{p,ээ} ;$$

- мощность, потребляемую от источника питания транзистором  $VTI$ ,  $P_0 = I_{k0} \cdot E_n$  ;

- КПД каскада с РН  $\eta = (P_{кэ} + P_{ээ}) / P_0$  ;

- коэффициент использования коллекторного источника питания в каскаде с РН  $\xi = |U_{кэ}| / E_n$  ;

- мощность, рассеиваемую на коллекторе транзистора  $VTI$   $P_k = P_0 - P_{кэ} - P_{ээ}$  .

Очевидно, что каждому значению проводимости  $\text{Re}[Y_{кэ}]$  будут соответствовать свои оптимальные значения проводимостей  $Y_z, Y_{ээ}, \text{Im}[Y_{кэ}]$ , удовлетворяющие приведенным выше условиям согласования (а), (б), (в). После определения энергетических параметров каскада с РН на резонансной частоте необходимо построить графики зависимостей данных параметров от действительной составляющей проводимости  $\text{Re}[Y_{кэ}]$  и определить значение  $\text{Re}[Y_{кэ}]$ , при котором параметры каскада с РН на резонансной частоте будут оптимальны. Далее по выражению (13) находим ток генератора, обеспечивающий входную мощность, необходимую для получения заданной мощности, отдаваемой в эмиттерную часть нагрузки, и считаем его постоянным:

$$I_z = \sqrt{\frac{2 \cdot P_z}{Y_{ex}} \cdot (Y_n + Y_{ex})^2}. \quad (13)$$

После этого по выражениям, приведенным в [7], рассчитываются входная и выходные цепи согласования.

На основании характеристик, представленных в [8], можно подойти к оценке устойчивости каскада с РН. Коэффициент устойчивости эквивалентного каскада с ОК (ОС)  $K_y^{кэ(сэ)}$  является исходным параметром при расчете каскада с РН, поэтому его значение не зависит от проводимости  $\text{Re}[Y_{кэ(сэ)}]$ . Известно [7], что в линейном режиме коэффициент устойчивости  $K_y$  характеризует, во-первых, удаленность от границы абсолютной устойчивости ( $K_y=1$ ), а во-вторых, степень искажения частотных характеристик за счет обратной связи в транзисторе. Указанные искажения малы, если  $K_y > 5$ . Коэффициент устойчивости нагруженного каскада с ОЭ (ОИ) уменьшается при уменьшении проводимости  $\text{Re}[Y_{кэ(сэ)}]$ . При этом возрастает мощность, отдаваемая в коллекторную (стоковую) часть нагрузки, и увеличивается  $\xi$  каскада с РН. При произвольном значении проводимости  $\text{Re}[Y_{кэ(сэ)}]$  устойчивость каскада с РН будет определяться меньшим из коэффициентов  $K_y^{кэ(сэ)}, K_y^{ээ(иэ)}$ , поэтому уменьшение проводимости  $\text{Re}[Y_{кэ(сэ)}]$  (с целью, например, поднять  $\xi$ , а значит, и КПД каскада) ниже определенного значения нецелесообразно, так как коэффициент устойчивости становится меньше заданного, что повышает возможность самовозбуждения каскада с РН.

Для частотного анализа каскада с РН задаем шаг изменения частоты в правую относительно резонансной частоты сторону. Затем по выражениям, зависящим от конкретных схем цепей согласования, рассчитываются приведенные к электродам транзистора  $VTI$  иммитансы  $Y_z, Y_{ээ}, Y_{кэ}$ . На новой частоте определяются значения матриц  $Y$ -параметров транзистора в схеме каскадов с ОЭ, с ОК, а также эквивалентных каскадов с ОЭ, с ОК. Рассчитывается входная мощность  $P_z$ , поступающая на базу транзистора  $VTI$  через расстроенную цепь согласования, при токе  $I_z$ , полученном по выражению (13):

$$P_z = \frac{1}{2} \cdot \left( I_z \cdot \left( \frac{Y_{ex}}{Y_{ex} + Y_z} \right) \right)^2 \cdot \frac{1}{Y_{ex}}.$$

Находятся энергетические характеристики каскада с РН на данной частоте по вышеприведенным выражениям.

Завершив расчет основных параметров каскада с РН на данной частоте, перестраиваем частоту на заданный шаг и повторяем расчет. Час-

тота сигнала увеличивается до достижения границы полосы пропускания.

Аналогично рассчитывается левая часть интересующего нас диапазона частот. Строим графические зависимости основных параметров каскада с РН от частоты.

В каскаде с РН используются три цепи согласования: между генератором сигнала и базой транзистора, между коллектором транзистора и общей нагрузкой каскада на СТ, цепь коррекции, включенная между эмиттером *VT1* и базой транзистора *VT2* структуры СТ. В [4] показано влияние вида цепи согласования (ФНЧ или ФВЧ) на параметры резонансных усилителей мощности. При наличии трех цепей согласования характер влияния становится более сложным и для выявления оптимальной схемы каскада с РН надо знать, как влияет каждый из контуров на параметры резонансного усилительного каскада с РН. Расстраивая по отдельности каждый из контуров в схеме каскада с РН, исключив при этом проявление частотной зависимости  $Y$ -параметров транзистора, авторы рассмотрели пораздельное влияния цепей согласования в виде Т- и П-звеньев (ФВЧ и ФНЧ). По результатам анализа были сделаны выводы:

- характер влияния цепей согласования в виде П- и Т-звеньев на коэффициенты передачи по мощности и устойчивости каскада с РН одинаков (при одинаковой добротности);

- цепи согласования в виде ФНЧ приводят к получению монотонно спадающей в пределах полосы пропускания частотной зависимости коэффициента устойчивости  $K_y$ ;

- цепи согласования в виде ФВЧ приводят к получению монотонно возрастающей в пределах полосы пропускания частотной зависимости коэффициента устойчивости  $K_y$ ;

- для получения равномерной зависимости  $K_y$  от частоты необходимо использовать комбинацию цепей согласования в виде ФНЧ и ФВЧ.

Видно, что в случае каскада с РН на его характеристики оказывает влияние вид колебательной системы (ФНЧ или ФВЧ). Учтя вышеизложенные выводы, синтезируем оптимальный для построения схем автогенераторов на СТ каскад с РН (рисунок 3), коллекторная и генераторная цепи согласования которого выполнены в виде П-звеньев ФНЧ, а эмиттерная – П-звена ФВЧ.

Для примера проведем частотный анализ схем, представленных на рисунке 3 и рисунке 4, выполненных на транзисторе 2Т610А.

Расчет основных параметров указанных каскадов на резонансной частоте 150 МГц привел к следующим результатам:

- номинальный коэффициент передачи по мощности каскада с РН в коллекторную часть нагрузки  $K_{p,кэ,н}=18$ ;

- номинальный коэффициент передачи по мощности каскада с РН в эмиттерную часть нагрузки  $K_{p,э,н}=1,8$ ;

- коэффициент устойчивости каскада по коллекторной цепи  $K_y^{кэ}=5,7$ ;

- коэффициент устойчивости каскада по эмиттерной цепи  $K_y^{э}=5,25$ .

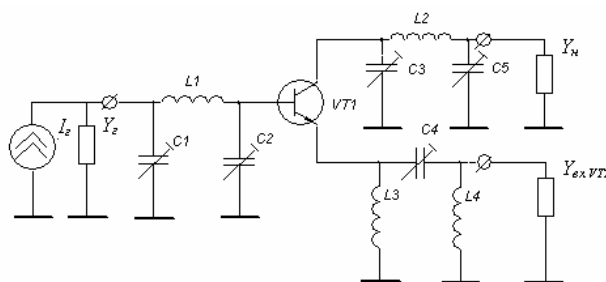


Рисунок 3 – Оптимальный резонансный усилительный каскад с РН

Полосу пропускания будем определять по уменьшению коэффициента усиления по мощности на ее границах в 2 раза. Тогда при работе усилителя в линейном режиме условие половинной выходной мощности (для определения границ полосы пропускания) эквивалентно условию уменьшения вдвое номинального коэффициента усиления по мощности, характеризующего всю цепочку передачи мощности от генератора сигнала в базовую цепь транзистора и от транзистора в нагрузку [7].

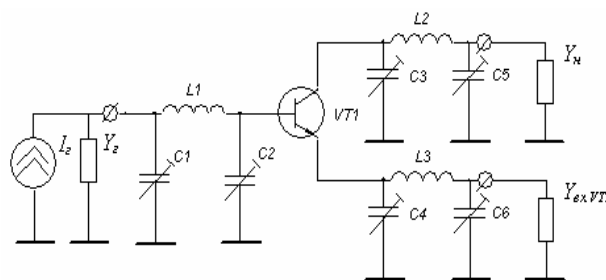


Рисунок 4 – Усилительный каскад с РН

Графики частотных зависимостей коэффициентов устойчивости каскада с РН, построенного по схеме с рисунка 3, представлены на рисунке 5, а построенного по схеме с рисунка 4 – на рисунке 6.

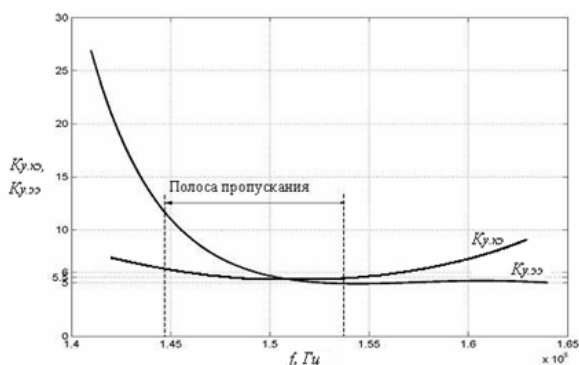
Известно [5], что лучшие характеристики имеют генераторные каскады на САП в виде гибридного СТ, у которого входным является полевой транзистор, а выходным - биполярный.

Исследование каскада с РН на полевом транзисторе 2П905А, аналогичном биполярному транзистору 2Т610А по мощностным и частот-

ным свойствам, проведенное в соответствии с приведенной выше методикой, показало аналогичные рисункам 5, 6 результаты.

Отличия в графиках, описывающих частотные зависимости параметров, связаны со значительными различиями значений активных составляющих входных и выходных проводимостей биполярного и полевого транзисторов.

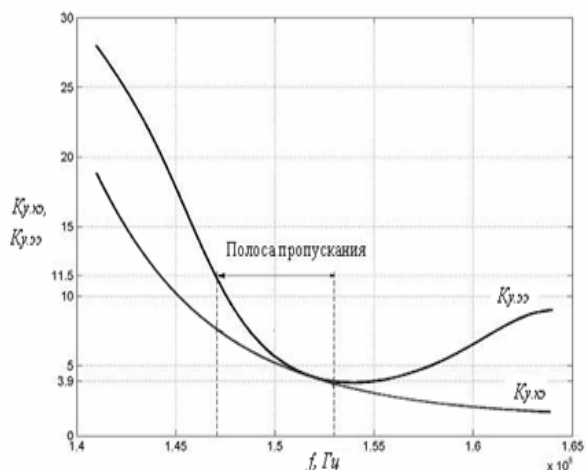
Для оценки равномерности коэффициента устойчивости в пределах полосы пропускания вводится коэффициент  $N_{K_y}$ , равный отношению максимального значения коэффициента устойчивости к его минимальному значению в пределах рабочего диапазона частот.



**Рисунок 5 – Зависимость коэффициентов устойчивости каскада с РН, построенного по схеме рисунка 3 по эмиттерной ( $K_{y,кэ}$ ) и коллекторной ( $K_{y,ээ}$ ) цепям, от частоты**

Сравнив результаты частотного анализа каскадов с РН (схемы рисунки 3, 4), отметим, что оба каскада имеют практически одинаковые зависимости номинальных коэффициентов передачи по мощности в коллекторную и эмиттерную части нагрузки каскада с РН.

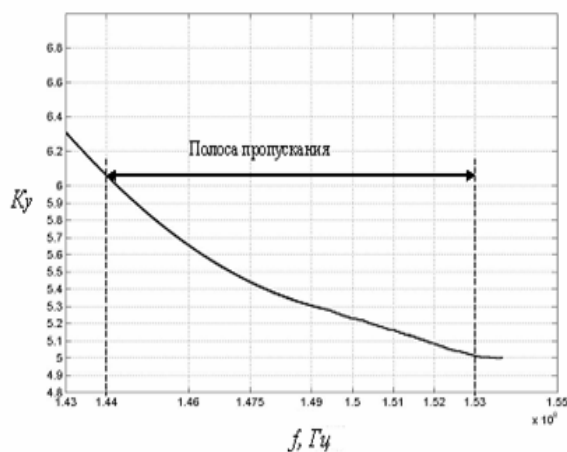
Зависимость коэффициента устойчивости по эмиттерной цепи каскада с РН (схема рисунка 3) не снижается ниже минимально допустимого значения  $K_y=5$  во всем диапазоне рабочих частот при неравномерности коэффициента устойчивости  $N_{K_y}=1,1$  в отличие от этой же зависимости каскада с РН (схема рисунка 4), у которого на протяжении практически половины рабочего диапазона частот значения  $K_{y,кэ}$  лежат ниже минимально допустимого уровня и опускаются до 3,75 у правой границы диапазона при  $N_{K_y}=2$ .



**Рисунок 6 – Зависимость коэффициента устойчивости каскада с РН, построенного по схеме рисунка 4 по эмиттерной ( $K_{y,кэ}$ ) и коллекторной ( $K_{y,ээ}$ ) цепям, от частоты**

Характер зависимостей коэффициента устойчивости по коллекторной цепи  $K_{y,ээ}$  обоих каскадов одинаков. Однако если значения  $K_{y,ээ}$  каскада, построенного по схеме рисунка 3, не снижаются ниже минимально допустимого значения  $K_y=5$  во всем диапазоне рабочих частот при  $N_{K_y}=2,3$ , то зависимость коэффициента устойчивости по коллекторной цепи  $K_{y,ээ}$  каскада с РН (схема рисунка 4) в правой части полосы пропускания лежит ниже значения  $K_y=5$  и у правой границы достигает значения  $K_{y,ээ}=3,9$  при  $N_{K_y}=2,95$ .

Обобщая полученные результаты, предлагаем результирующую зависимость коэффициента устойчивости  $K_y$  каскада с РН от частоты определять, используя зависимости коэффициентов устойчивости по коллекторной  $K_{y,ээ}$  и эмиттерной  $K_{y,кэ}$  цепям каскада, причем характеристика с наименьшим  $K_y$  и будет характеризовать удаленность всего каскада с РН от границы самовозбуждения на данной частоте.



**Рисунок 7 – Зависимость  $K_y$  каскада с РН (схема рисунка 3) от частоты**

Для примера на рисунке 7 приведена частотная зависимость коэффициента устойчивости  $K_u$  резонансного усилительного каскада с РН, построенного по схеме рисунка 3. Именно по этой схеме, как показал приведенный сравнительный анализ, и следует составлять схему каскада с РН как части САП типа СТ – активного прибора генераторных и автогенераторных каскадов.

#### **Выводы**

1. Предложена методика оценки влияния пораздельной расстройки колебательных контуров резонансного каскада с РН на его основные частотные параметры.

2. Проведен частотный анализ резонансного усилительного каскада с РН на биполярном (полевом) транзисторе, результаты представлены в виде графических зависимостей.

3. Предложен подход к построению схем каскадов с РН, позволяющий получать более равномерные частотные зависимости коэффициентов устойчивости в допустимом диапазоне изменения их значений.

#### **Библиографический список**

1. Баранов А.А., Богданов А.С., Васильев Е.В. Управление амплитудой выходного сигнала в генераторных каскадах на гибридных составных транзисторах / Научно-технический журнал «Вестник Рязан-

ской государственной радиотехнической академии», Выпуск 19, 2006. – С. 103...106.

2. Богданов А.С., Лицишин В.П., Волков В.С. Стабилизирующие устройства на ПАВ для автогенераторных устройств бортовой аппаратуры / 5-я международная конференция «Авиация и космонавтика - 2006». 23-26 октября 2006 г. – Москва: Тезисы докладов. – М.: Изд-во МАИ, 2006. – 388 с.

3. Авторское свидетельство 1424115 СССР. Высокочастотный составной транзистор / Ю.И. Судаков, А.С. Богданов, Д.Я. Нагорный. №4135391/24-09; Заявл. 17.10.86; Опубл. 1988. Бюл. № 34.

4. Лицишин В.П., Богданов А.С. Частотные свойства мощного резонансного усилителя с низкодобротными колебательными системами / Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова / РНТО РЭС им. А. С. Попова, Ин-т радиотехники и электроники РАН, Рос. секция IEEE. – М., 2007.- 204 с., 81-85 с.

5. Богданов А.С., Другов С.А., Судаков Ю.И. Транзисторный генератор с разделенной нагрузкой // Радиотехника. – 1989. - №2. – с. 83...85.

6. Проектирование усилительных устройств / под ред. Н.В. Терпугова. – М.: Высшая школа, 1982. – 190 с.

7. Богачев В.М., Никифоров В.В. Транзисторные усилители мощности. – М.: Энергия, 1978. -344 с.

8. Судаков Ю.И., Богданов А.С. Теория и расчет каскада с разделенной нагрузкой как части составного транзистора / Рязан. радиотех. ин-т. – Рязань, 1987. – 22 с. – Деп. в НИИЭИР № 8289.