

УДК 621.372:621.375

Г.Н. Якушевич

Алгоритм расчета транзисторного широкополосного усилителя с двухполосником параллельной обратной связи

Предложен алгоритм расчета транзисторного широкополосного усилителя на основе математической модели активного четырехполосника для широкополосного усилителя с двухполосником параллельной обратной связи (ОС). Предложена обобщенная структурная схема активного четырехполосника, представленного активным элементом, на входе или выходе которого включена симметрирующая цепь (СЦ) и фазизирующе-трансформирующие цепи (ФТЦ) на входе и выходе.

Ключевые слова: алгоритм, математическая модель, активный четырехполосник, широкополосный усилитель, двухполосник, параллельная ОС.

Введение

При проектировании транзисторных широкополосных усилителей для выравнивания амплитудно-частотных характеристик и согласования применяются цепи параллельной ОС. Известные алгоритмы проектирования и расчета усилителя в этом случае состоят в поиске структуры и параметров элементов цепи двухполосника параллельной ОС, обеспечивающих заданные условия согласования, необходимую полосу пропускания, коэффициент усиления. При этом зачастую цепь ОС получается сложной структуры. В [1–2] было показано, что при использовании простейших структур цепей двухполосников ОС необходимо с помощью ФТЦ и фазизирующих цепей (ФЦ) приблизить параметры активного элемента к требуемым параметрам активного четырехполосника для каскада широкополосного усилителя с двухполосником параллельной ОС. В данной работе для приближения параметров активного элемента к требуемым параметрам активного четырехполосника предложена обобщенная структурная схема активного четырехполосника, представленного активным элементом, на входе или выходе которого включена СЦ и ФТЦ на входе и выходе.

Требуемые S -параметры активного четырехполосника для широкополосного каскада с двухполосником параллельной ОС

Математическая модель в виде аналитических выражений для требуемых S -параметров и номинального коэффициента передачи по мощности идеально однонаправленного активного четырехполосника для согласованного каскада широкополосного усилителя с двухполосником параллельной ОС, представленного на рис. 1, запишется [1]

$$S_{11\text{АЧ}} = S_{22\text{АЧ}} = \frac{Y_{\text{ОС}} \cdot (1 - S_{21\text{ОС}})}{2 - Y_{\text{ОС}} \cdot (1 - S_{21\text{ОС}})}, \quad (1)$$

$$S_{21\text{АЧ}} = \frac{2 \cdot (2 \cdot S_{21\text{ОС}} - Y_{\text{ОС}} \cdot (1 - S_{21\text{ОС}}^2))}{(2 - Y_{\text{ОС}} \cdot (1 - S_{21\text{ОС}}))^2}, \quad (2)$$

$$G_{\text{НОМАЧ}} = |S_{21}|^2 / \left(1 - |S_{11\text{АЧ}}|^2\right)^2, \quad (3)$$

где $S_{11\text{АЧ}}$, $S_{22\text{АЧ}}$, $S_{21\text{АЧ}}$, $G_{\text{НОМАЧ}}$, $S_{21\text{ОС}}$, $Y_{\text{ОС}}$ – коэффициенты отражения по входу и выходу, прямой коэффициент передачи, номинальный коэффициент передачи по мощности активного четырехполосника, прямой коэффициент передачи каскада широкополосного усилителя с параллельной ОС и проводимость двухполосника параллельной ОС.

Считая широкополосный усилитель с параллельной ОС идеальным, обладающим равномерной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) и линейной фазочастотной характеристикой (ФЧХ), т.е.

$$|S_{21\text{ОС}}(f)| = \text{const} \quad \text{и} \quad \Theta_{21\text{ОС}} = \arg S_{21\text{ОС}}(f) = 180^\circ \cdot (1 - f/f_B), \quad (4)$$

где f – текущая частота; f_B – частота нормировки; задавая значение коэффициента передачи в виде $S_{21\text{ОС}} = |S_{21\text{ОС}}| \cdot \exp(i \cdot \Theta_{21\text{ОС}})$ для заданной структуры двухполосника параллельной ОС по соотношениям (1)–(3), можно рассчитать требуемые зависимости S -параметров и номинального коэффициента передачи по мощности $G_{\text{НОМ}}$ активного четырехполосника без двухполосника параллельной ОС.

Из выражения (1) видно, что для согласования с помощью двухполюсника параллельной ОС активный четырехполюсник должен иметь одинаковые коэффициенты отражения по входу и выходу.

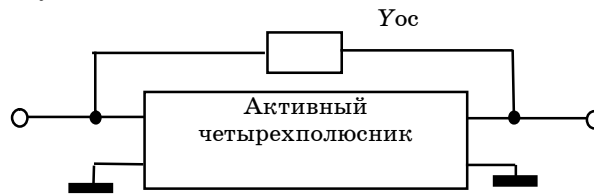


Рис. 1. Активный четырехполюсник с двухполюсником параллельной ОС

На низкой частоте коэффициенты отражения по входу и выходу активного четырехполюсника близки к единице ($S_{11АЧ} = S_{22АЧ} = 1$) и для согласованного каскада широкополосного усилителя с параллельной ОС проводимость резистивного R -двухполюсника ОС из выражения (1) равна

$$Y_{OCR} = 1 / (1 + |S_{21OC}|). \quad (5)$$

Тогда из выражения (2) с учетом (5) по низкочастотному значению модуля коэффициента передачи активного четырехполюсника $S_{21АЧ}(180^\circ)$ можно определить максимально достижимое значение модуля коэффициента передачи широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной ОС в следующем виде:

$$|S_{21OC}| = |S_{21АЧ}(180^\circ)| / 2 - 1. \quad (6)$$

В общем случае зависимости S -параметров активного элемента отличаются от требуемых зависимостей S -параметров активного четырехполюсника, рассчитанных по выражениям (1)–(3), и для получения одинаковых коэффициентов отражения на входе и выходе активного элемента необходимо включать СЦ, а для получения требуемого значения модуля и фазы коэффициента передачи – ФТЦ.

Обобщенная структурная схема для широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной ОС на основе активного элемента с ФТЦ и СЦ на входе и выходе представлена на рис. 2, а. Однако при расчете даже простейших СЦ имеется множество решений. Поэтому в данной работе рассмотрены только варианты включения СЦ на входе или выходе активного элемента (см. рис. 2, б, в). Вариант включения СЦ выбирается на основе анализа коэффициентов отражения по входу и выходу активного элемента и СЦ вводится там, где наибольшее отличие от требуемых коэффициентов отражения активного четырехполюсника.

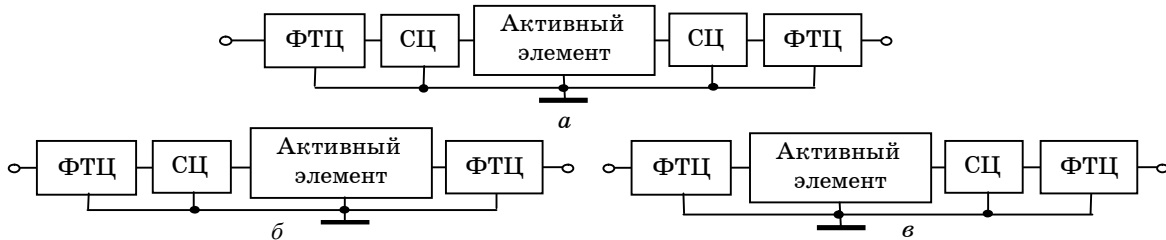


Рис. 2. Обобщенные структурные схемы активных четырехполюсников:

- а – ФТЦ и СЦ на входе и выходе активного элемента;
- б – ФТЦ и СЦ на входе и ФТЦ на выходе активного элемента;
- в – ФТЦ на входе и ФТЦ и СЦ на выходе активного элемента

Расчет СЦ на входе или выходе активного элемента

Рассмотрим структурные схемы активного элемента с простейшими L - или Γ -образными СЦ без потерь, включенными на входе или выходе активного элемента, представленные на рис. 3.

Γ -образная СЦ (см. рис. 3, в, г) понижает, а L -образная СЦ (см. рис. 3, а, б) повышает сопротивление источника, подключенного к их входу. Поэтому выбор структурной схемы активного четырехполюсника зависит от коэффициентов отражения по входу и выходу активного элемента.

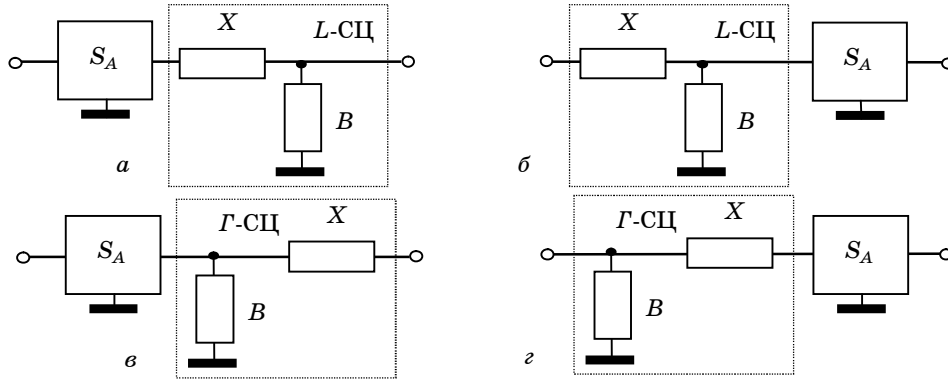


Рис. 3. Схемы активного элемента с L- и Γ-образными ЦЦ включенными на выходе (а, в) или входе (б, г) активного элемента

Учитывая, что L- и Γ-образные ЦЦ состоят из реактивных элементов, найдем S-параметры активного элемента с ЦЦ и приравняв коэффициенты отражения по входу и выходу, получим уравнение

$$W_{XB} \cdot X \cdot B + W_X \cdot i \cdot X + W_B \cdot i \cdot B + W_O = 0, \quad (7)$$

где $i = \sqrt{-1}$, X и B – нормированные сопротивление и проводимость ЦЦ.

Из выражения (7) запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(W_{XB}) \cdot X \cdot B - \operatorname{Im}(W_X) \cdot X - \operatorname{Im}(W_B) \cdot B + \operatorname{Re}(W_O) = 0, \\ \operatorname{Im}(W_{XB}) \cdot X \cdot B + \operatorname{Re}(W_X) \cdot X + \operatorname{Re}(W_B) \cdot B + \operatorname{Im}(W_O) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} W_{XB} \left(\begin{matrix} \Gamma_{BX}, (L_{BX}) \\ \Gamma_{ВYX}, (L_{ВYX}) \end{matrix} \right) &= \mp \left[(S_{11(22)} - 1) \cdot (1 + S_{22(11)}) - S_{12} \cdot S_{21} \right] \\ W_X \left(\begin{matrix} \Gamma_{BX}, \Gamma_{ВYX} \\ L_{BX}, L_{ВYX} \end{matrix} \right) &= \mp \left[(S_{11} - 1) \cdot (S_{22} - 1) - S_{12} \cdot S_{21} \right] \\ W_B \left(\begin{matrix} \Gamma_{BX}, \Gamma_{ВYX} \\ L_{BX}, L_{ВYX} \end{matrix} \right) &= \pm \left[(1 + S_{11}) \cdot (1 + S_{22}) - S_{12} \cdot S_{21} \right] \\ W_O \left(\begin{matrix} \Gamma_{ВYX}, L_{BX} \\ \Gamma_{BX}, L_{ВYX} \end{matrix} \right) &= \pm 2 \cdot (S_{11} - S_{22}) \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Верхний знак \mp и \pm относится к верхним индексам, а нижний – к нижним индексам в скобках; гвх и L вх – индексы для расчета ЦЦ на входе активного элемента, гвых и L вых – индексы для расчета ЦЦ на выходе активного элемента, $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ – S-параметры активного элемента.

Решение системы уравнений (8) относительно элементов ЦЦ проводимости B и сопротивления X запишется

$$B_{1,2} = \frac{-\operatorname{Im}(\overline{W_{XB}} \cdot W_O + \overline{W_B} \cdot W_X)}{2 \cdot \operatorname{Re}(\overline{W_{XB}} \cdot W_B)} \pm \sqrt{\left(\frac{\operatorname{Im}(\overline{W_{XB}} \cdot W_O + \overline{W_B} \cdot W_X)}{2 \cdot \operatorname{Re}(\overline{W_{XB}} \cdot W_B)} \right)^2 - \frac{\operatorname{Re}(\overline{W_O} \cdot W_X)}{2 \cdot \operatorname{Re}(\overline{W_{XB}} \cdot W_B)}}, \quad (10)$$

$$X_{1,2} = \frac{\operatorname{Re}(W_O) - B_{1,2} \cdot \operatorname{Im}(W_B)}{B_{1,2} \cdot \operatorname{Re}(W_{XB}) + \operatorname{Im}(W_X)}, \quad (11)$$

где $\overline{W_{XB}}, \overline{W_B}, \overline{W_O}$ – комплексно-сопряженные коэффициенты W_{XB}, W_B, W_O .

В зависимости от знака нормированных значений B и X на частоте ω и для сопротивления тракта R определяются значения номиналов индуктивности L или емкости C: для $X > 0$ – индуктивность $L = X \cdot R / \omega$; для $X < 0$ – емкость $C = -1 / (\omega \cdot X \cdot R)$; для $B > 0$ – емкость $C = B / (\omega \cdot R)$; для $B < 0$ – индуктивность $L = -R / (\omega \cdot B)$.

Расчет каскада широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной ОС на максимальный коэффициент передачи

Алгоритм расчета ориентирован на максимальное приближение зависимостей S-параметров активного элемента к требуемым зависимостям S-параметров активного четырех-

полюсника для широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной ОС и заключается в следующем:

1) для заданного типа транзистора на основе низкочастотного значения модуля коэффициента передачи по формуле (6) определяется максимально достижимое низкочастотное значение модуля коэффициента передачи каскада с параллельной ОС $|S_{21OC}|$ и по выражениям (1)–(3) с учетом (4)–(5) рассчитываются требуемые зависимости S -параметров и номинального коэффициента передачи по мощности $G_{НОМ АЧ}$ активного четырехполюсника;

2) строим зависимости S -параметров и номинального коэффициента передачи по мощности активного элемента и активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной ОС;

3) на основе равенства номинального коэффициента передачи по мощности активного четырехполюсника $G_{НОМ АЧ}(0^\circ)$ и номинального коэффициента передачи по мощности активного элемента определяется верхняя граничная частота каскада широкополосного усилителя;

4) на верхней граничной частоте проводится выбор варианта включения (СЦ на входе или выходе), выбор структуры (Γ -образная или L -образная СЦ), расчет элементов СЦ и расчет S -параметров активного элемента с СЦ;

5) затем сравниваются зависимости S -параметров активного элемента с СЦ с требуемыми зависимостями S -параметров активного четырехполюсника и на основе сравнения на входе и выходе активного элемента с СЦ вводятся ФТЦ, уточняется структура двухполюсника параллельной ОС;

6) проводится расчет S -параметров широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной ОС.

Применим этот алгоритм к расчету каскада широкополосного усилителя на транзисторе КТ3115, работающего в линейном режиме.

В таблице приведены значения S -параметров транзистора КТ3115 и рассчитанного по ним номинального коэффициента передачи $G_{НОМ}$ для инвариантного коэффициента устойчивости $K_{УС} = 1,1$.

По низкочастотному значению коэффициента передачи транзистора КТ3115 из таблицы определим по формуле (6) максимально достижимое низкочастотное значение модуля коэффициента передачи каскада с параллельной ОС $|S_{21OC}| = 9,9$ (20 дБ) и по формуле (5) нормированную проводимость двухполюсника параллельной ОС $Y_{OC} = 1/11$ (сопротивление двухполюсника параллельной ОС для 50-омного тракта равно 550 Ом).

S -параметры и $G_{НОМ}$ транзистора КТ3115

F , ГГц	$ S_{11} $	Θ_{11} , град	$ S_{12} $, дБ	Θ_{12} , град	$ z_{11} $, дБ	Θ_{21} , град	$ S_{22} $	Θ_{22} , град	$G_{НОМ}$, дБ
0,01	0,78	-3	59,2	89	26,8	178	0,99	-1	40
0,1	0,76	-26	39,2	78	26,6	168	0,97	-10	31
0,4	0,56	-84	29,2	56	22,8	123	0,75	-25	24
0,8	0,43	-128	27,5	52	18,4	99	0,61	-29	21
1,2	0,39	-154	25,8	54	15,3	86	0,56	-32	18,6
1,6	0,37	-172	24,2	57	13,1	75	0,54	-35	16,8

Рассчитанные по выражениям (1)–(3) с учетом (4)–(5) требуемые зависимости S -параметров и номинального коэффициента передачи по мощности активного четырехполюсника $G_{НОМ АЧ}$ для $|S_{21OC}| = 20$ дБ и зависимости S -параметров и номинального коэффициента передачи по мощности транзистора $G_{НОМ КТ3115}$ из таблицы приведены на рис. 4, 5.

Сравнивая номинальные коэффициенты передачи активного четырехполюсника $G_{НОМ АЧ}(0^\circ)$ и транзистора $G_{НОМ КТ3115}$ на рис. 5, определяем верхнюю граничную частоту каскада широкополосного усилителя 1,2 ГГц.

На верхней граничной частоте 1,2 ГГц наиболее сильно отличаются от требуемых значений коэффициент отражения транзистора КТ3115 по выходу $S_{22 КТ3115}$ (см. рис. 4) и значение фазы коэффициента прямой передачи транзистора $\theta_{21 КТ3115} = 86^\circ$ (см. рис. 5).

Для приближения коэффициента отражения $S_{22 КТ3115}$ к требуемым S -параметрам активного четырехполюсника и уменьшения выходного сопротивления транзистора на его

выходе вводится Г-образная СЦ. Нормированные значения элементов Г-образной СЦ, рассчитанные по выражениям (10)–(11), равны: $X_1 = 1,0$ ($L = 6,7$ нГн), $B_1 = 0,55$ ($C=1,45$ пФ) и $X_2 = -1,25$ ($C=2,63$ пФ), $B_2 = 0,55$ ($L = 4,86$ нГн). Для каскада широкополосного усилителя выбираем Г-образную СЦ с элементами $L = 6,7$ нГн и $C = 1,45$ пФ.

На рис. 4 приведены результаты расчета коэффициентов отражения S_{11} ктз115 сц и S_{22} ктз115 сц, а на рис. 5 – коэффициента прямой передачи S_{21} ктз115 сц транзистора КТЗ115 с Г-образной СЦ на выходе.

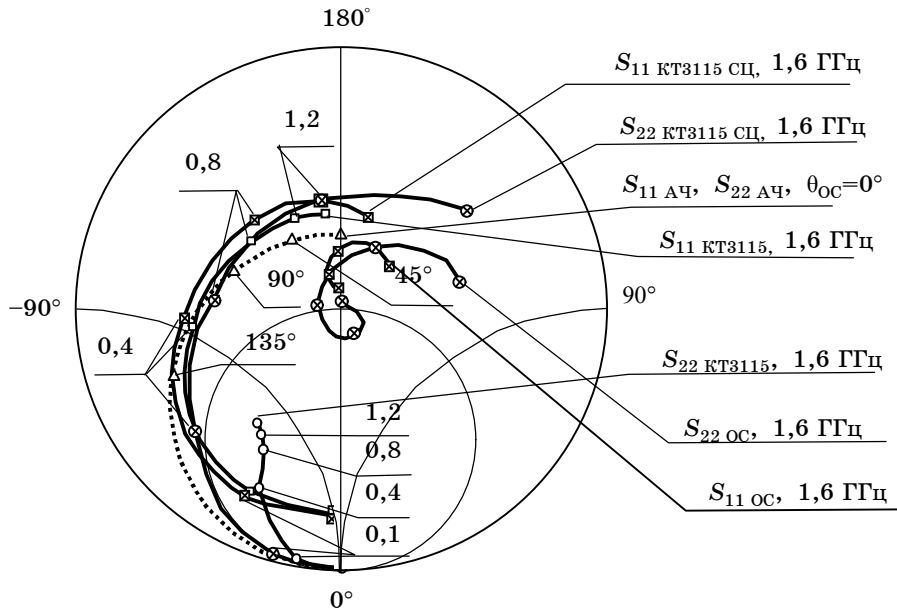


Рис. 4. Зависимости коэффициентов отражения

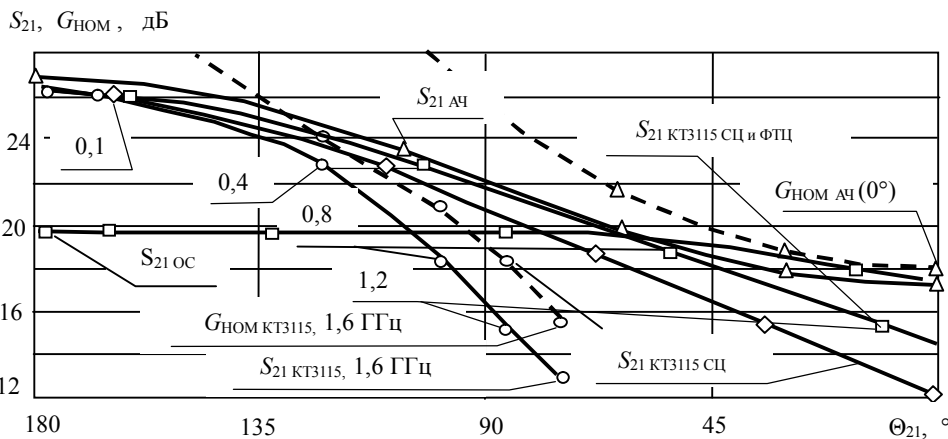


Рис. 5. Зависимости коэффициентов прямой передачи и по мощности

Для приближения фазы коэффициента прямой передачи транзистора S_{21} ктз115 сц к требуемому значению фазы S_{21} ач (см. рис. 5) на входе и выходе вводим ФТЦ в виде плосковых линий с волновым сопротивлением 50 Ом и электрической длиной $\theta = 12^\circ$.

На рис. 6 приведена схема для численного моделирования каскада широкополосного усилителя с R-двухполюсником параллельной ОС с учетом сопротивления цепи питания, равного 1 кОм, а на рис. 4–5 – результаты расчета коэффициентов отражения S_{11} ос, S_{22} ос и прямой передачи S_{21} ос. Для экспериментальных исследований был собран каскад широкополосного усилителя на транзисторе КТЗ115 с использованием чип-элементов. Результаты расчета и эксперимента приведены на рис. 7.

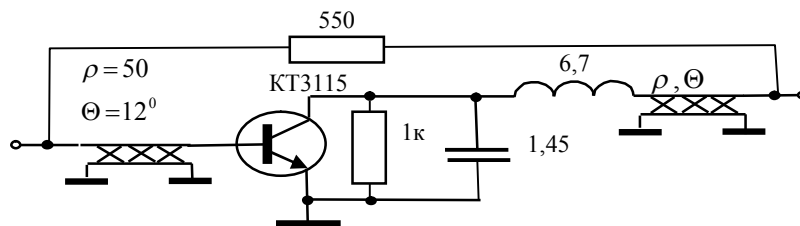
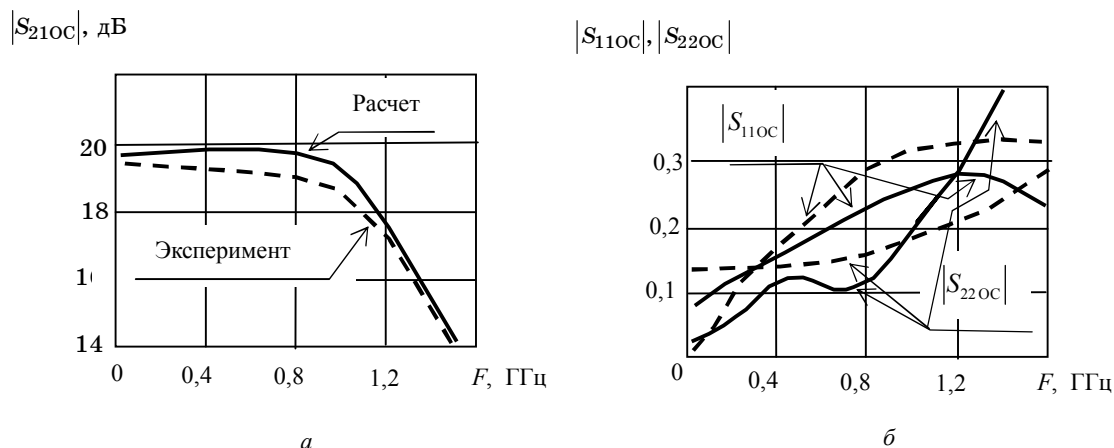
Рис. 6. Каскад широкополосного усилителя с R -двухполосником ОС

Рис. 7. Коэффициенты передачи (а) и отражения (б) усилителя с ОС

Полученные результаты

Предложен алгоритм расчета каскада транзисторного широкополосного усилителя с двухполосником параллельной ОС, основанный на том, что прежде чем ввести двухполосник параллельной ОС необходимо приблизить S -параметры данного активного элемента на основе выбора варианта включения СЦ (на входе или выходе), структуры СЦ (Γ - или L -образной) и ФТЦ к требуемым S -параметрам активного четырехполосника для каскада широкополосного усилителя с двухполосником параллельной ОС.

Литература

1. Якушевич Г.Н. Математическая модель активного четырехполосника для широкополосного СВЧ-усилителя с двухполосником параллельной обратной связи // Доклады ТУСУРа. – 2009. – № 2(20). – С. 32–37.
2. Jakushevitch G.N. A new approach to the wide band UHF amplifiers with feedback design// 1998 4th International conference on actual problems of electronic engineering proceedings 'APEIE-98'. – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, – 1998. – Vol. 1. – P. 295–296.

Якушевич Геннадий Николаевич

Канд. техн. наук, с.н.с., доцент каф. средств радиосвязи ТУСУРа
Тел.: 41-37-09
Эл. почта: mrc@main.tusur.ru

Jakushevitch G.N.

Calculation algorithm of a wideband amplifier with two-pole parallel feedback

There is suggested an algorithm of a wideband amplifier calculation on the basis of an active four-pole for a wideband amplifier with two-pole parallel feedback (FB). There is also suggested a generalized structure circuit of the active four-pole presented by an active element with a balance circuit at the input or the output and the phase shifting circuits at the input and at the output.

Keywords: algorithm, mathematical model, active four-pole, wideband amplifier, two-pole, parallel feedback.