

УДК 621.372:621.375

Г.Н. Якушевич

Проектирование транзисторных широкополосных усилителей с двухполюсником параллельной обратной связи

Приведены результаты проектирования транзисторных широкополосных усилителей на основе математической модели активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной обратной связи (ОС).

Ключевые слова: проектирование, математическая модель, активный четырехполюсник, широкополосный усилитель, двухполюсник, параллельная ОС.

В работах [1–2] было показано, что для простых структур двухполюсников параллельной ОС прежде чем ввести двухполюсник параллельной ОС необходимо приблизить параметры активного элемента к требуемым параметрам активного четырехполюсника для каскада широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной ОС с помощью фазирующе-трансформирующей цепи (ФТЦ) или Г-, L-образной симметрирующей цепи (СЦ) на входе или выходе и фазирующих цепей (ФЦ) на входе и выходе. В данной работе для приближения параметров активного элемента к требуемым параметрам активного четырехполюсника в качестве СЦ рассмотрена полосковая линия.

Требуемые S-параметры активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной ОС

Математическая модель в виде аналитических выражений для требуемых S-параметров и номинального коэффициента передачи по мощности идеально однонаправленного активного четырехполюсника для согласованного каскада широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной ОС, представленного на рис. 1, запишется [2]

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

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

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

где $S_{11АЧ}$, $S_{22АЧ}$, $S_{21АЧ}$, $G_{НОМАЧ}$, $S_{21ОС}$, $Z_{ОС}$ – коэффициенты отражения по входу и выходу, прямой коэффициент передачи, номинальный коэффициент передачи по мощности активного четырехполюсника, прямой коэффициент передачи каскада широкополосного усилителя с параллельной ОС и сопротивление двухполюсника параллельной ОС.

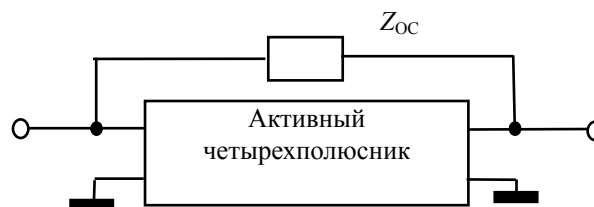


Рис. 1. Активный четырехполюсник с двухполюсником параллельной ОС

Задавая значение коэффициента передачи в виде

$$S_{21ОС} = |S_{21ОС}| \cdot \exp(i \cdot \Theta_{21ОС}), \quad (4)$$

где $|S_{21OC}(f)| = \text{const}$; $\Theta_{21OC} = \arg S_{21OC}(f) = 180^\circ \cdot (1 - f/f_B)$; f – текущая частота; f_B – частота нормировки; для заданной структуры двухполюсника параллельной ОС по соотношениям (1)–(3), можно рассчитать требуемые зависимости S -параметров и номинального коэффициента передачи по мощности $G_{НОМАЧ}$ активного четырехполюсника без двухполюсника параллельной ОС [1].

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

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

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

На основе выражений (1), (4), (5) требуемое входное и выходное сопротивления активного четырехполюсника для согласованного каскада широкополосного усилителя с резистивным R -двухполюсником параллельной ОС определится соотношением

$$Z_{ВХ} = Z_{ВЫХ} = \frac{1 + S_{11АЧ}}{1 - S_{11АЧ}} = W \cdot [1 - j \cdot \text{tg}(\Theta_{OC}/2)], \quad (6)$$

где $W = (1 + |S_{21OC}|) / (2 \cdot |S_{21OC}|)$.

Это выражение описывает последовательное соединение резистора и ненагруженного четверть-волнового отрезка однородной линии с волновым сопротивлением W или последовательный резонансный контур с потерями.

С учетом (5) из выражения (2) и (3) найдем требуемое низкочастотное значение коэффициента передачи $|S_{21АЧ}(180^\circ)|$ и значение коэффициентов отражения $S_{11АЧ}(0^\circ)$, $S_{22АЧ}(0^\circ)$ на верхней частоте, а из выражения (3) с учетом (1), (2) – номинальный коэффициент передачи $G_{НОМАЧ}(0^\circ)$ на верхней частоте активного однонаправленного четырехполюсника для широкополосного каскада с R -двухполюсником параллельной ОС.

$$|S_{21АЧ}(180^\circ)| = 2 \cdot (1 + |S_{21OC}|), \quad (7)$$

$$S_{11АЧ}(0^\circ) = S_{22АЧ}(0^\circ) = \frac{1 - |S_{21OC}|}{1 + 3 \cdot |S_{21OC}|}, \quad (8)$$

$$G_{НОМАЧ}(0^\circ) = \left[\frac{(1 + |S_{21OC}|) \cdot (3 \cdot |S_{21OC}| - 1)}{4 \cdot |S_{21OC}|} \right]^2. \quad (9)$$

Рассчитанные по выражениям (2) и (7)–(9) требуемые значения $|S_{21АЧ}(180^\circ)|$, $|S_{21АЧ}(0^\circ)|$, $S_{11АЧ}(0^\circ)$, $S_{22АЧ}(0^\circ)$, $G_{НОМАЧ}(0^\circ)$ для $|S_{21OC}| = 18, 15, 12, 10$ дБ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Требуемые параметры активного четырехполюсника, дБ

$ S_{21OC} $	18	15	12	10
$ S_{21АЧ}(180^\circ) $	25,0	22,4	20,0	18,4
$ S_{21АЧ}(0^\circ) $	15,5	12,8	10,2	8,5
$S_{11АЧ}(0^\circ), S_{22АЧ}(0^\circ)$	-0,278	-0,259	-0,23	-0,206
$G_{НОМАЧ}(0^\circ)$	16,2	13,4	10,7	8,9

В общем случае зависимости параметров активного элемента отличаются от требуемых параметров активного четырехполюсника, приведенных в табл. 1, и для получения равных коэффициен-

тов отражения (1) на входе или выходе активного элемента необходимо включать СЦ, а для получения требуемого значения модуля и фазы коэффициента передачи – ФТЦ на входе и выходе [2].

Расчет СЦ на входе или выходе активного элемента

Структурные схемы активного элемента с СЦ на основе полосковой линии, включенной на входе или выходе активного элемента, представлены на рис. 2.

Находя S -параметры активного элемента с СЦ и приравнивая коэффициенты отражения по входу и выходу аналогично [2], найдем выражения для волнового сопротивления ρ и электрической длины Θ полосковой линии в следующем виде:

$$\rho = \sqrt{\frac{\operatorname{Re}[(S_{11} - S_{22}) \cdot \Delta_S]}{\operatorname{Re}[(S_{11} - S_{22}) \cdot \Delta_{SS}]}} \quad (10)$$

$$\Theta_{\text{ВХ (ВЫХ)}} = +(-) \operatorname{arctg} \left\{ \frac{\operatorname{Re}(S_{11} - S_{22}) \cdot \rho}{\operatorname{Im}[\Delta_{SS} \cdot \rho^2 - \Delta_S]} \right\} \quad (11)$$

где $\Delta_S = (1 + S_{11}) \cdot (1 + S_{22}) - S_{12} \cdot S_{21}$, $\Delta_{SS} = (1 - S_{11}) \cdot (1 - S_{22}) - S_{12} \cdot S_{21}$; S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} – S -параметры активного элемента, $S_{11} - S_{22}$ – комплексно-сопряженный результат вычисления.

Расчет каскадов широкополосных усилителей с двухполосником параллельной ОС

В табл. 2 приведены рассчитанные на основе эквивалентной схемы, приведенной в [3], значения S -параметров транзистора КТ3115 и рассчитанного по ним номинального коэффициента передачи $G_{\text{НОМ}}$ для инвариантного коэффициента устойчивости $K_{\text{УС}} = 1,1$.

Таблица 2

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

F , ГГц	$ S_{11} $	Θ_{11} , °	$ S_{12} $, дБ	Θ_{12} , °	$ S_{21} $, дБ	Θ_{21} , °	$ S_{22} $	Θ_{22} , °	$G_{\text{НОМ}}$, дБ
0,1	0,76	-25	-39	78	26,3	162	0,97	-10	31,0
0,5	0,52	-96	-29	54	21,7	116	0,7	-27	23,5
1,0	0,41	-140	-26,5	52	16,9	93	0,57	-32	19,8
1,2	0,39	-152	-26	54	15,5	86	0,55	-33	18,5
1,5	0,38	-166	-25	56	13,7	79	0,54	-35	16,5
1,75	0,37	-176	-24	57	12,4	73	0,53	-38	15,0
2,1	0,37	173	-23	58	11,0	65	0,53	-42	13,4
2,5	0,37	161	-21	58	9,5	58	0,53	-46	12,0
3,0	0,38	148	-20	58	8,1	49	0,53	-53	10,5
3,5	0,39	137	-19	57	6,9	40	0,53	-60	9,5
4,0	0,4	127	-18	55	5,8	32	0,54	-67	9,0
4,25	0,41	122	-17	54	5,3	28	0,55	-71	8,5

На основе номинального коэффициента передачи по мощности $G_{\text{НОМ}}$ транзистора КТ3115 табл. 2 для значений коэффициента усиления широкополосного усилителя с двухполосником параллельной ОС $|S_{21\text{ОС}}| = 18; 15; 12; 10$ дБ составлена табл. 3.

Таблица 3

Номинальные коэффициенты передачи транзистора КТ3115

$ S_{21\text{ОС}} $, дБ	18	15	12	10
$G_{\text{НОМКТ3115}}$, дБ	16,5	13,0	10,5	9,0
$F_{\text{В}}$, ГГц	1,5	2,1	3,0	4,0

Сравнение номинальных коэффициентов передачи транзистора КТ3115 $G_{\text{НОМКТ3115}}$ (см. табл. 3) и активного четырехполосника $G_{\text{НОМАЧ}}(0^\circ)$ (см. табл. 1) показывает, при обеспечении

соответствующих $|S_{21KT3115}(180^\circ)|$ и $S_{11KT3115}(0^\circ) = S_{22KT3115}(0^\circ)$ при введении R -двухполюсника параллельной ОС (5) получим равномерный коэффициент передачи $|S_{21OC}| = 18; 15; 12; 10$ дБ до верхней частоты $F_B = 1,5; 2,1; 3,0; 4,0$ ГГц соответственно.

Наиболее сильно от требуемых параметров активного четырехполюсника (см. табл. 1) отличаются коэффициенты отражения по выходу транзистора КТ3115 $S_{22KT3115}$ на частотах 1,5; 2,1; 3,0; 4,0 ГГц, а также коэффициент прямой передачи транзистора КТ3115 $S_{21KT3115}$ на частоте 0,1 ГГц, равный 26,3 дБ (см. табл. 2) вместо требуемых значений коэффициентов передачи $|S_{21AЧ}(180^\circ)| = 25; 22,4; 20; 18,4$ дБ для $|S_{21OC}| = 18; 15; 12; 10$ дБ соответственно.

Для приближения коэффициента прямой передачи транзистора КТ3115 $|S_{21KT3115}|$ на частоте 0,1 ГГц к требуемому значению активного четырехполюсника последовательно с входом транзистора включается емкость C_{BX} , нормированное значение которой рассчитывается по формуле

$$C_{BX} = \frac{1}{2[A-1]} \left[-\text{Im}(S_{11KT3115}) + \sqrt{[A-1](\text{Re}(S_{11KT3115})-1)^2 + A(\text{Im}(S_{11KT3115}))^2} \right], \quad (12)$$

где $A = \left(\frac{|S_{21KT3115}|}{|S_{21AЧ}|} \right)^2$.

Для равенства коэффициентов отражений по входу и выходу транзистора КТ3115 на частотах 1,5; 2,1; 3,0; 4,0 ГГц на выходе транзистора вводится СЦ на полосковой линии, параметры которой рассчитываются на основе S -параметров транзистора с учетом емкости C_{BX} S_{KT3115} C_{BX} по формулам (10)–(11).

На основе полученных S -параметров транзистора КТ3115 с емкостью на входе C_{BX} и СЦ на выходе уточняется сопротивление двухполюсника параллельной ОС на частотах 1,5; 2,1; 3,0; 4,0 ГГц по формуле

$$Z_{OC} = \frac{(1 - S_{21KT3115}C_{Ц})(1 + S_{12KT3115}C_{Ц}) - S_{11KT3115}C_{Ц}S_{22KT3115}C_{Ц}}{2S_{11KT3115}C_{Ц}}. \quad (13)$$

Результаты расчета номиналов входной емкости, нормированные параметры (номиналы) полосковой линии СЦ и двухполюсника параллельной ОС приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета

F_B , ГГц	1,5	2,1	3,0	4,0
C_{BX} , пФ	34,6	10,4	5,8	4,3
ρ , Ом	1,13 (56,5)	1,13 (56,5)	1,20 (60)	1,04 (52)
$\Theta_{\text{вых}}$, град	1,05 (60)	1,05 (60)	1,09 (62,5)	1,04 (0,8) (59,6) (46)
Z_{OC} , Ом	4,52+2,06i (226+103i)	3,25+1,22i (162,5+61i)	1,89-0,25i (94,5-12,5i)	1,36-0,43i (68-21,5i)
R , Ом	8 (450)	6,6 (330)	5 (250)	4,16 (208)
C , пФ	0,235	0,24	0,25	0,26
L , нГ	34,6	18	5,3	3

Результаты расчета показывают, что из-за отличия S -параметров транзистора КТ3115 с емкостью на входе C_{BX} и полосковой СЦ на выходе от требуемых значений S -параметров активного четырехполюсника (см. табл. 1) для согласования на верхней частоте сопротивление параллельной ОС должно быть комплексным. При этом реальная часть комплексного сопротивления $\text{Re}(Z_{OC})$ должна быть меньше сопротивления R двухполюсника параллельной ОС, рассчитанного по формуле (5).

Структурная схема реализации такого комплексного сопротивления параллельной ОС Z_{OC} , с учетом рассчитанного по формуле (5) сопротивления R , приведена на рис. 3, на котором представ-

лен каскад широкополосного усилителя с Z_{OC} -двухполосником параллельной ОС. Сопротивление 1 к в цепи коллектора обеспечивает устойчивость усилителя.

Номиналы емкости и индуктивности определяются по следующим выражениям:

$$C = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{R - \operatorname{Re}(Z_{OC})}{\operatorname{Re}(Z_{OC})}} \frac{1}{\omega_B}, \quad (14)$$

$$L = \frac{\sqrt{\operatorname{Re}(Z_{OC})[R - \operatorname{Re}(Z_{OC})] + \operatorname{Im}(Z_{OC})}}{\omega_B}, \quad (15)$$

где $\omega_B = 2 \pi F_B$.

Рассчитанные по выражениям (14)–(15) номиналы емкостей и индуктивностей каскада широкополосного усилителя (см. рис. 3) для верхних частот $F_B = 1,5; 2,1; 3,0; 4,0$ ГГц приведены в табл. 4.

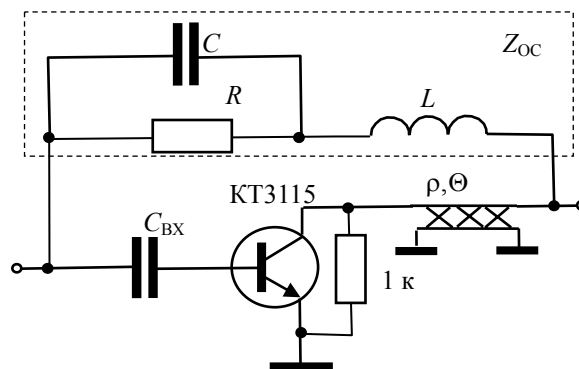


Рис. 3. Каскад широкополосного усилителя с Z_{OC} двухполосником параллельной ОС

Результаты расчета частотных зависимостей коэффициентов передачи, коэффициентов отражений по входу и выходу каскадов широкополосных усилителей с Z_{OC} -двухполосником параллельной ОС (см. рис. 3) на основе S -параметров транзистора KT3115 из табл. 2 и значений элементов из табл. 4 приведены на рис. 4.

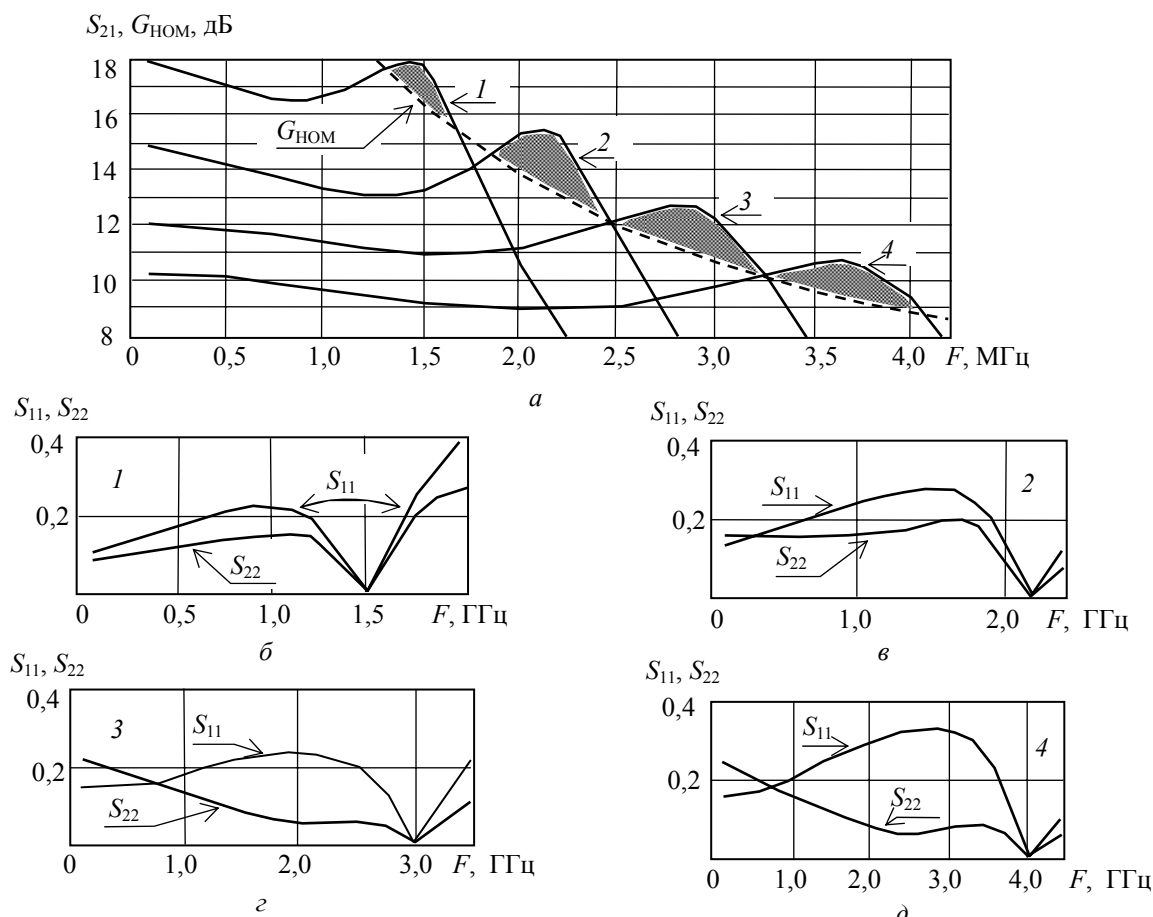


Рис. 4 Частотные характеристики коэффициентов передачи (а), коэффициентов отражения по входу и выходу (б)–(д) широкополосных усилителей с верхней частотой: 1,5 ГГц – 1; 2,1 ГГц – 2; 3 ГГц – 3; 4 ГГц – 4

Экспериментальная проверка аналогичных теоретических исследований была приведена автором в предыдущих статьях [1, 2] и показала достоверность полученных теоретических результатов.

Полученные результаты:

– Приведены результаты математического проектирования широкополосных усилителей на транзисторе КТ3115 на основе математической модели активного четырехполюсника для широкополосного каскада с двухполюсником параллельной ОС.

– Показана идентичность поведения частотных характеристик широкополосных усилителей с верхней частотой: 1,5; 2,1; 3; 4 ГГц (см. рис. 4).

– На верхних частотах получается выигрыш в коэффициенте передачи по отношению к номинальному за счет положительной ОС (см. рис. 4, а, заштрихованная область), при этом широкополосные усилители абсолютно устойчивы (рассчитанный $K_{yc} \geq 1,03$).

Литература

1. Якушевич Г.Н. Математическая модель активного четырехполюсника для широкополосного СВЧ-усилителя с двухполюсником параллельной обратной связи // Доклады ТУСУРа. – 2009. – № 2 (20). – С. 32–37.

2. Якушевич Г.Н. Алгоритм расчета транзисторного широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной обратной связи // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 1 (21). – С. 63–68.

3. Андриухов И.П., Докучаев Ю.П., Корнильев Г.Э. и др. Кремневый малошумящий биполярный транзистор КТ3115 // Микроэлектроника и полупроводниковые приборы / Под ред. А.А. Васенкова и Я.А. Федотова. – М.: Сов. радио, 1980. – Вып. 5. – С. 43–53.

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.

Design of wideband transistor amplifiers with two-pole parallel feedback

There are given the results of the design of wideband amplifier on the mathematic model of the active four-pole with two-pole parallel feedback (FB).

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