

УДК 621.372:621.375

Г.Н. Якушевич

## Проектирование транзисторных широкополосных усилителей с двухполосниками параллельной и последовательной обратной связи

Приведены результаты проектирования транзисторных широкополосных усилителей на основе требуемых параметров активного четырехполосника для широкополосного усилителя с двухполосником параллельной обратной связи (ОС). Приближение параметров активного элемента осуществляется введением корректирующего двухполосника, последовательной ОС и симметрирующе-фазирующей цепи (СФЦ).

**Ключевые слова:** проектирование, активный четырехполосник, широкополосный усилитель, двухполосник, параллельная и последовательная ОС.

В работах [1–3] было показано, что для простых структур двухполосников параллельной ОС прежде чем ввести двухполосник параллельной ОС, необходимо приблизить параметры активного элемента к требуемым параметрам активного четырехполосника для каскада широкополосного усилителя с двухполосником параллельной ОС с помощью фазирующе-трансформирующей цепи (ФТЦ) или полосковой линии, Г-, L-образной симметрирующей цепи (СЦ) на входе или выходе и фазирующих цепей (ФЦ) на входе и выходе. В данной работе приближение параметров активного элемента к требуемым параметрам активного четырехполосника осуществляется введением корректирующего двухполосника, последовательной ОС и СФЦ на входе или выходе активного элемента.

**Постановка задачи.** В данной работе для приближения параметров активного элемента к требуемым параметрам активного четырехполосника для широкополосного усилителя с двухполосником параллельной ОС предложена обобщенная структурная схема активного четырехполосника, представленного активным элементом с двухполосником последовательной ОС, корректирующим двухполосником на входе и СФЦ на выходе. Последовательная ОС и корректирующий двухполосник на входе приближают коэффициент отражения по входу активного элемента к требуемым параметрам активного четырехполосника. СФЦ одновременно выполняет функцию СЦ, обеспечение равенства коэффициентов отражения по входу-выходу и функцию ФТЦ, получение требуемого значения фазы коэффициента передачи активного элемента, что упрощает реализацию и настройку широкополосного усилителя.

**Расчет СФЦ на выходе активного элемента.** На рис. 1 представлена структурная схема каскада широкополосного усилителя с параллельной ОС, содержащая активный элемент с двухполосником последовательной ОС и корректирующим двухполосником на входе и СФЦ на выходе.

На рис. 2 приведены структурные схемы активного четырехполосника с СФЦ.

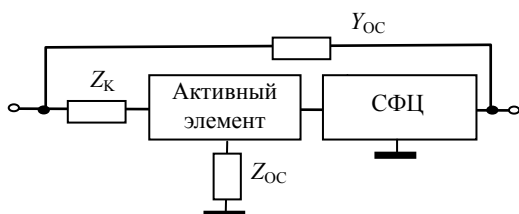


Рис. 1. Структурная схема каскада широкополосного усилителя

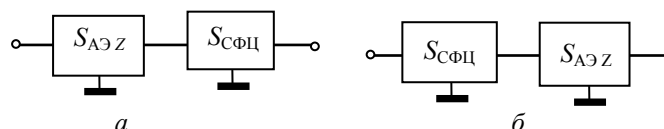


Рис. 2. Структурные схемы активного четырехполосника с СФЦ, включенной на выходе (а) и входе (б) активного элемента

На основе матрицы  $S$ -параметров активного четырехполосника с двухполосником последовательной ОС и корректирующим двухполосником на входе

$$[S_{AЭЗ}] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $[S_{AЭЗ}]$ ,  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$  – матрица и элементы матрицы  $S$ -параметров активного четырехполюсника, и матрицы  $S$ -параметров СФЦ [4]

$$[S_{СФЦ}] = \begin{bmatrix} s_{11} & | & s_{12} \\ s_{21} & | & s_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & | & \sqrt{1-|s_{11}|^2} \exp(i\Theta_{12}) \\ \sqrt{1-|s_{11}|^2} \exp(i\Theta_{12}) & | & -s_{11}^* \exp(i\Theta_{12}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $[S_{СФЦ}]$ ,  $s_{11}$ ,  $s_{12}$ ,  $s_{21}$ ,  $s_{22}$  – матрица и элементы матрицы  $S$ -параметров СФЦ;  $\Theta_{12}$  – фаза коэффициента передачи СФЦ. Матрица  $S$ -параметров каскадного соединения активного элемента с двухполюсником последовательной ОС, корректирующим двухполюсником на входе и СФЦ на выходе (рис. 2, а) запишется [5]

$$[S_{AЭЗСФЦ}] = \begin{bmatrix} S_{11} \text{ AЭЗСФЦ} & | & S_{12} \text{ AЭЗСФЦ} \\ S_{21} \text{ AЭЗСФЦ} & | & S_{22} \text{ AЭЗСФЦ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} + \frac{s_{11}S_{21}S_{12}}{1-S_{22}s_{11}} & | & \frac{S_{12}s_{12}}{1-S_{22}s_{11}} \\ \frac{S_{21}s_{12}}{1-S_{22}s_{11}} & | & s_{22} + \frac{s_{12}S_{12}S_{22}}{1-S_{22}s_{11}} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $[S_{AЭЗСФЦ}]$ ,  $S_{11}$  AЭЗСФЦ,  $S_{12}$  AЭЗСФЦ,  $S_{21}$  AЭЗСФЦ,  $S_{22}$  AЭЗСФЦ – матрица и элементы матрицы  $S$ -параметров каскадного соединения.

Приравняв в выражении (3) коэффициенты отражения по входу и выходу и решив полученное уравнение относительно коэффициента отражения СФЦ  $s_{11}$  с учетом выражения (2), получим

$$s_{11} = \frac{\operatorname{Re}\{[S_A - \Delta_S]S_B^*\} + i \cdot \operatorname{Im}\{[S_A + \Delta_S]S_B^*\}}{|\Delta_S|^2 - 1}, \quad (4)$$

где  $S_A = -\exp(i2\Theta_{12})$ ,  $S_B = [\exp(i2\Theta_{12})S_{22(11)} - S_{11(22)}]$ ,  $\Delta_S = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$ , индексы в скобках относятся к СФЦ, включенной на входе активного элемента;  $S_B^*$  – комплексно-сопряженное значение.

Задавая значения аргумента  $\Theta_{12}$  в выражении (4) и подставляя полученное значение коэффициента отражения  $s_{11}$  в выражение (2), получим значения  $S$ -параметров СФЦ на заданной частоте, на основе которых по выражению (3) найдем  $S$ -параметры каскадного соединения активного элемента с СФЦ на выходе.

Выражение для проводимости двухполюсника ОС с учетом выражение (3) запишется [3]

$$Y_{ОС} = \frac{2S_{11} \text{ AЭЗСФЦ}}{(1-S_{21} \text{ AЭЗСФЦ})(1-S_{12} \text{ AЭЗСФЦ}) - S_{11} \text{ AЭЗСФЦ} S_{22} \text{ AЭЗСФЦ}}. \quad (5)$$

Переходя от  $[S_{СФЦ}]$  к  $Y$ - и  $Z$ -параметрам СФЦ, определим значение элементов П-образной и Т-образной СФЦ (рис. 3, а, б), включаемых на выходе или входе активного элемента.

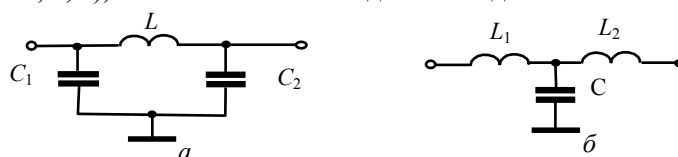


Рис. 3. Схемы П-образной и Т-образной СФЦ

**Математическое моделирование широкополосного усилителя с двухполюсниками параллельной и последовательной обратной связи.** Математическое моделирование проведем на основе эквивалентной схемы кристалла транзистора КТ3115, приведенной в работе [6], исключив элементы корпуса, которые затрудняют приблизить параметры транзистора к требуемым параметрам активного четырехполюсника для каскада широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной ОС.

В табл. 1 приведены результаты расчета элементов П- и Т-образной СФЦ, а в табл. 2 – результаты расчета элементов двухполюсника параллельной ОС для значения аргумента СФЦ  $\Theta_{12} = -65, -75, -85^\circ$  на частоте 1,05 ГГц.

Результаты расчета элементов двухполюсника параллельной ОС приведены в табл. 2. При  $\Theta_{12} = -65^\circ$  для согласования требуется двухполюсник параллельной ОС из последовательно включенных резистора и индуктивности, при  $\Theta_{12} = -75^\circ$  двухполюсник параллельной ОС – резистивный и при  $\Theta_{12} = -85^\circ$  двухполюсник параллельной ОС – параллельное соединение резистора и емкости.

Таблица 1

$\Theta_{12}$ , град	П-образная СФЦ			Т-образная СФЦ		
	$C_1$ , пФ	$L$ , нГн	$C_2$ , пФ	$L_1$ , нГн	$C$ , пФ	$L_2$ , нГн
-65	1,41	10,87	0	0	1,41	10,85
-75	1,36	11,67	1,45	9,34	1,81	8,80
-85	1,38	12,90	2,80	15,78	2,14	7,81

Таблица 2

$\Theta_{12}$ , град	П-образная СФЦ		Т-образная СФЦ	
	$R$ , Ом	$L$ , нГн	$R$ , Ом	$C$ , пФ
-65	495	47,4	—	—
-75	580	—	580	—
-85	—	—	521	0,47

На рис. 4, *a* и *б* приведены принципиальные схемы каскадов широкополосных усилителей с П- и Т-образными СФЦ на выходе для  $\Theta_{12} = -75^\circ$  с верхней частотой 1,05 ГГц соответственно. Для приближения коэффициента отражения по входу введены последовательная ОС в виде индуктивности, которая увеличивает активную составляющую входного сопротивления, и корректирующая индуктивность на входе, компенсирующая реактивную составляющую входного сопротивления. Сопротивление 1 к, подключенное к коллектору транзистора, обеспечивает абсолютную устойчивость каскада усилителя.

На рис. 5 приведены частотные характеристики коэффициентов передачи и коэффициентов отражений. Заштрихованные области на рис. 5, *б* и *г* показывают выигрыш коэффициента передачи в области верхних частот по отношению к номинальному коэффициенту передачи за счет положительной ОС.

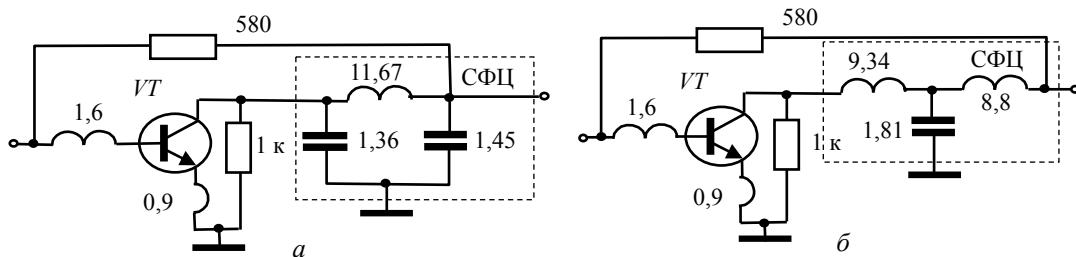


Рис. 4. Принципиальные схемы каскадов широкополосных усилителей с П-образной (*a*) и Т-образной (*б*) СФЦ на выходе с верхней частотой 1,05 ГГц

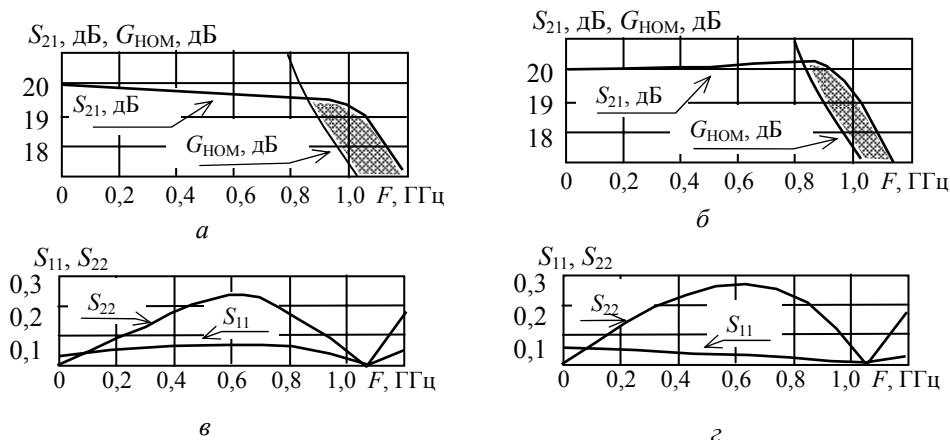


Рис. 5. Частотные характеристики коэффициента передачи (*a*), коэффициентов отражения по входу и выходу (*б*) усилителя с П-образной СФЦ на выходе и коэффициента передачи (*б*), коэффициентов отражения по входу и выходу (*г*) усилителя Т-образной СФЦ на выходе

На рис. 6, а и б приведены схемы каскадов широкополосных усилителей с П- и Т-образными СФЦ на выходе с верхней частотой 2 ГГц. На рис. 7 приведены частотные характеристики коэффициентов передачи и коэффициентов отражений. Сопротивление последовательной ОС приближает коэффициент передачи активного элемента на нижних частотах к требуемому коэффициенту передачи активного четырехполюсника с параллельной ОС.

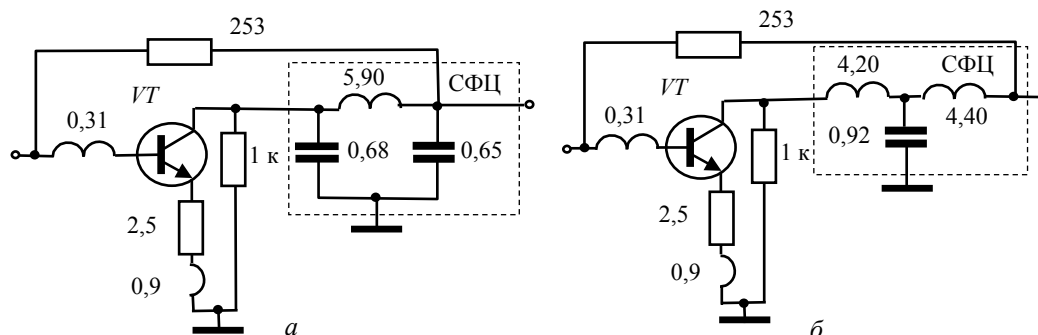


Рис. 6. Схемы каскадов широкополосных усилителей с П-образной (а) и Т-образной (б) СФЦ на выходе с верхней частотой 2 ГГц

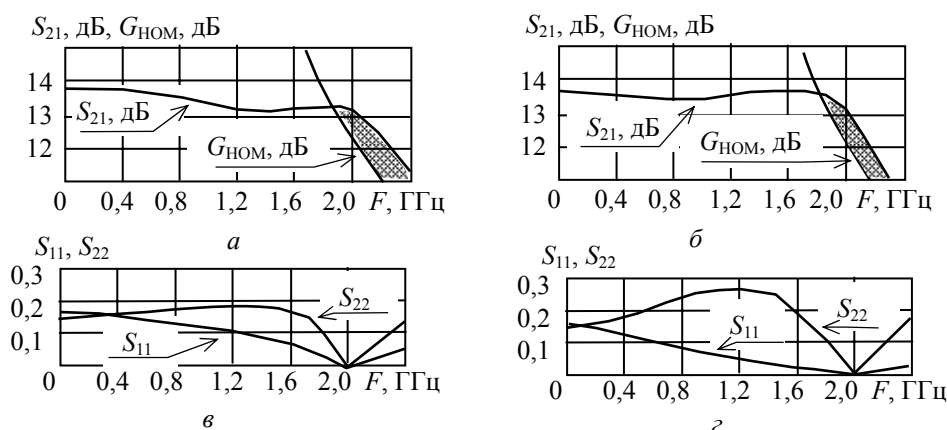


Рис. 7. Частотные характеристики коэффициента передачи (а), коэффициентов отражения по входу и выходу (б) усилителя с П-образной СФЦ на выходе и коэффициента передачи (б), коэффициентов отражения по входу и выходу (з) усилителя Т-образной СФЦ на выходе

Достоверность аналогичных теоретических исследований с помощью математического моделирования на основе эквивалентных схем активных элементов были подтверждены результатами экспериментальных исследований в предыдущих статьях [1, 2].

**Полученные результаты.** Предложен алгоритм проектирования широкополосных усилителей с параллельной ОС на основе требуемых параметров активного четырехполюсника с параллельной ОС, в котором приближение параметров активного элемента к требуемым параметрам активного четырехполюсника осуществляется введением корректирующего двухполюсника на входе, последовательной ОС и СФЦ.

Приведены результаты проектирования широкополосных усилителей с верхней граничной частотой 1,05 и 2,0 ГГц и показа выигрыша коэффициента передачи в области верхних частот по отношению к номинальному коэффициенту передачи за счет положительной ОС.

#### Литература

1. Якушевич Г.Н. Математическая модель активного четырехполюсника для широкополосного СВЧ-усилителя с двухполюсником параллельной обратной связи // Доклады ТУСУРа (Томск). – 2009. – № 2 (20). – С. 32–37.
2. Якушевич Г.Н. Алгоритм расчета транзисторного широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной обратной связи // Доклады ТУСУРа (Томск). – 2010. – № 1 (21). – С. 63–68.

3. Якушевич Г.Н. Проектирование транзисторных широкополосных усилителей с двухполюсником параллельной обратной связи // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 1 (23). – С. 65–70.
  4. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырехполюсников и восьмиполусников на СВЧ. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Связь, 1971. – 388 с.
  5. Силаев М.А., Брянцев С.Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ-устройств. – М.: Сов. радио, 1979. – 247 с.
  6. Андрюхов И.П., Докучаев Ю.П., Корнильев Г.Э. и др. Кремневый малошумящий биполярный транзистор КТЗ115 // 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, ст. науч. сотрудник, доцент каф. средств радиосвязи ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 41-37-09

Эл. почта: mrc@main.tusur.ru

Jakushevitch G.N.

**Design of wideband transistor amplifiers with two-pole parallel and serial feedback**

The results of designing transistor wideband amplifiers based on the required parameters of the active four-pole for wideband amplifier with two-pole parallel feedback (FB). These parameters are provided of the active element using of the correction two-pole, consistent FB and balance-phases circuit (BPC).

**Keywords:** design, active four-pole, wideband amplifier, two-pole, parallel and serial OS.

---