## УДК 621.372.621.375

# Г.Н. Якушевич

# Проектирование корректирующего широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной обратной связи

Для компенсации неравномерности AЧХ приемных трактов приведены результаты проектирования корректирующих широкополосных усилителей на основе математической модели активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной обратной связи (OC).

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

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-144-147

Для компенсации неравномерности АЧХ приемных трактов, которая может достигать более 5 дБ, используют диссипативные корректирующие цепи.

Целью данной работы является компенсация неравномерности АЧХ приемных трактов с помощью АЧХ корректирующих широкополосных усилителей с двухполюсником параллельной обратной связью.

#### Требуемые S-параметры активного четырехполюсника для корректирующего широкополосного усилителя с 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 OC, представленного на рис. 1, запишется [1]

$$S_{11AY} = S_{22AY} = \frac{Y_{OC}(1 - S_{21OC})}{2 - Y_{OC}(1 - S_{21OC})},$$
 (1)

$$S_{21AY} = \frac{2(2S_{21OC} - Y_{OC}(1 - S_{21OC}^2))}{(2 - Y_{OC}(1 - S_{21OC}))^2},$$
 (2)

$$G_{\text{HOMAY}} = \left| S_{21AY} \right|^2 / \left( 1 - \left| S_{11AY} \right|^2 \right)^2, \qquad (3)$$

где S<sub>11A4</sub>, S<sub>22A4</sub>, S<sub>21A4</sub>, G<sub>HOM A4</sub>, S<sub>21OC</sub>, Y<sub>OC</sub> – 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 проводимость двухполюсника параллельной ОС.



Рис. 1. Активный четырехполюсник с двухполюсником параллельной ОС

Значение коэффициента передачи для корректирующего широкополосного усилителя задается в следующем виде:

$$S_{21\text{OC}} = \left| S_{21\text{OC}} \right| \cdot \exp(i \cdot \Theta_{21\text{OC}}) , \qquad (4)$$

где

$$\Theta_{21\text{OC}} = \arg S_{21\text{OC}}(f) = 180^{\circ} \cdot (1 - f/f_{\text{B}}),$$
  
$$|S_{21\text{OC}}(f)| = S_{210}(1 + N(f/f_{B})),$$

f – текущая частота;  $f_{\rm B}$  – частота нормировки;  $S_{210}$  – начальный коэффициент усиления на нижней частоте; N – коэффициент неравномерности АЧХ, определяет увеличение коэффициента усиления на верхней частоте относительно коэффициента усиления на нижней частоте.

Коэффициент усиления на нижней частоте находится в пределах 2–10 раз (6–20 дБ). Неравномерность АЧХ может составлять 1,4–2 раза (3–6 дБ). Ниже приведены результаты расчета для усредненных значений коэффициента передачи на нижней частоте и неравномерности АЧХ для требуемых *S*-параметров корректирующего широкополосного усилителя с параллельной обратной связью.

На рис. 2 приведены рассчитанные по формулам (1)–(4) требуемые зависимости коэффициентов передачи  $S_{21RL}$ ,  $S_{21R}$ ,  $S_{21RC}$  и номинальные коэффициенты передачи по мощности  $G_{\text{HOM RL}}$ ,  $G_{\text{HOM RC}}$ , а на рис. 3 – требуемые коэффициенты отражений  $S_{11RL}$ ,  $S_{11R}$ ,  $S_{11RC}$  для RL-двухполюсника, R-двухполюсника и RC-двухполюсника параллельной ОС для начального коэффициента передачи  $S_{210} = 6$  (15,5 дБ) и коэффициента неравномерности N = 0,6.

Заштрихованные области на рис. 2 показывают выигрыш в коэффициенте передачи корректирующего широкополосного усилителя с параллельной ОС по отношению к номинальному коэффициенту передачи по мощности активного четырехполюсника без параллельной ОС.

Прежде чем ввести параллельную ОС, необходимо максимально приблизить параметры активного элемента к требуемым параметрам активного четырехполюсника.

В общем случае зависимости параметров активного элемента отличаются от требуемых параметров активного четырехполюсника, приведенных на рис. 2, 3, и для получения равных коэффициентов отражения выражения (1) на входе или выходе активного элемента необходимо включать симметрирующе-фазирующюю цепь (СФЦ) [2], а для получения требуемого значения модуля и фазы коэффициента передачи – фазирующе-трансформирующие цепи (ФТЦ) на входе и выходе. Для обеспечения начального коэффициента передачи на вход активного элемента включается корректирующий Z<sub>K</sub>-двухполюсник.



Рис. 2. Требуемые зависимости коэффициетов передачи *S*<sub>21АЧ</sub> и номинальных коэффициентов передачи по мощности *G*<sub>HOM</sub> активного четырехполюсника для корректирующего широкополосного усилителя с параллельной ОС



Рис. 3. Требуемые зависимо вти коэффициетов отражений активного четырехполюсника для корректирующего широкополосного усилителя с параллельной ОС

На рис. 4 приведена структурная схема корректирующего широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной ОС, приближающая *S*-параметры активного элемента к требуемым *S*-параметрам активного четырехполюсника рис. 2 и 3.



лосного усилителя с параллельной ОС

Матрица *S*-параметров корректирующего двухполюсника *Z*<sub>K</sub> запишется [3]

$$\mathbf{S}_{Z_{K}} = \left[\frac{S_{11Z_{K}}}{S_{21Z_{K}}} \middle| \frac{S_{12Z_{K}}}{S_{22Z_{K}}}\right] = \left[\frac{Z_{K}/(2+Z_{K})}{Z_{K}/(2+Z_{K})} \middle| \frac{Z_{K}/(2+Z_{K})}{Z_{K}/(2+Z_{K})} \right],$$
(4)

где двухполюсник  $Z_{\rm K}$  – параллельное соединение сопротивления  $R_{\rm K}$  и емкости  $C_{\rm K}$ .

Сопротивление *R*<sub>K</sub> и емкость *C*<sub>K</sub> определяются на нижней частоте по формулам

$$R_{\rm K} = \frac{2(S_{21\rm A} \to 0}{S_{21\rm A} \to 0} - S_{21\rm A} \to 0)} R_{\Gamma}, \quad C_{\rm K} = 1/(2\pi f_{\rm H} R_{\rm K}), \quad (4a)$$

где  $S_{21A \to 0}$ ,  $S_{11A \to 0}$ ,  $S_{21A \to 0}$ ,  $S_{11A \to 0}$  – коэффициенты передачи и отражения активного элемента и активного четырехполюсника;  $R_{\Gamma}$  – сопротивление генератора;  $f_{\rm H}$  – нижняя частота.

Матрица *S*-параметров каскадного соединения активного элемента и корректирующего двухполюсника *Z*<sub>K</sub> на входе запишется [4]

$$\mathbf{S}_{A\exists Z} = \begin{bmatrix} S_{11A\exists Z} & | S_{12A\exists Z} \\ \overline{S_{21A\exists Z}} & | S_{22A\exists Z} \\ \overline{S_{22A\exists Z}} \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} S_{11Z\kappa} + \frac{S_{11A\exists}S_{21Z\kappa}S_{12Z\kappa}}{1 - S_{22Z\kappa}S_{11A\exists}} & | S_{12Z\kappa}S_{12A\exists} \\ \overline{1 - S_{22Z\kappa}S_{12A\exists}} \\ \overline{1 - S_{22Z\kappa}S_{11A\exists}} & | S_{22A\exists} + \frac{S_{12A\exists}S_{12A\exists}S_{22Z\kappa}}{1 - S_{22Z\kappa}S_{11A\exists}} \end{bmatrix},$$
(5)

где  $S_{A \ni Z}$ ,  $S_{11A \ni Z}$ ,  $S_{12A \ni Z}$ ,  $S_{21A \ni Z}$ ,  $S_{22 A \ni Z}$  – матрица и элементы матрицы *S*-параметров каскадного соединения активного элемента и корректирующего двух-полюсника  $Z_{\rm K}$ ,  $S_{11A \ni}$ ,  $S_{12A \ni}$ ,  $S_{21A \ni}$ ,  $S_{22 A \ni}$  – *S*-параметры активного элемента.

Матрица S-параметров СФЦ запишется [2, 3]

$$\mathbf{S}_{\mathrm{C}\Phi\mathrm{II}} = \left[ \frac{s_{11}}{\sqrt{1 - |s_{11}|^2} \exp(i\,\Theta_{12})} \middle| \frac{\sqrt{1 - |s_{11}|^2} \exp(i\,\Theta_{12})}{-s_{11}^* \exp(i\Theta_{12})} \right], \quad (6)$$

где  $S_{C\Phi II}$ ,  $s_{11}$ ,  $s_{12}$ ,  $s_{21}$ ,  $s_{22}$  – матрица и элементы матрицы *S*-параметров СФЦ;  $\Theta_{12}$  – фаза коэффициента передачи СФЦ

$$s_{11} = \frac{\text{Re}\{[S_{\text{A}} - \Delta_{S}]S_{\text{B}}^{*}\} + i \cdot \text{Im}\{[S_{A} + \Delta_{S}]S_{\text{B}}^{*}\}}{|\Delta_{S}|^{2} - 1}, \quad (7)$$

где  $S_A = -\exp(i2\Theta_{12}), S_B = [\exp(i2\Theta_{12})S_{22A3Z} - S_{11A3Z}],$ 

 $\Delta_S = S_{11A\exists Z} S_{22A\exists Z} - S_{12A\exists Z} S_{21A\exists Z}, S_B^*$  – комплексно-сопряженное значение.

Переходя от *S*-параметров СФЦ (6) к *Y*-параметрам, найдем матрицу *Y*-параметров П-образной СФЦ (рис. 5) и элементы матрицы в следующем виде

$$\mathbf{Y}_{\mathrm{C}\Phi\mathrm{I}\mathrm{I}} = \begin{bmatrix} \frac{Y_{11}}{Y_{21}} + \frac{Y_{12}}{Y_{22}} + \frac{Y_{12}}{Y_{22}} \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} \frac{j\omega C_{1}}{-1/j\omega L} + \frac{j\omega L}{j\omega L} + \frac{-1/j\omega L}{j\omega C_{2}} + \frac{1/j\omega L}{j\omega L} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где  $Y_{11C\Phi II}$ ,  $Y_{12C\Phi II}$ ,  $Y_{21C\Phi II}$ ,  $Y_{22C\Phi II}$ , – параметры СФЦ;  $C_1, L, C_2$  – элементы П-образной СФЦ,  $\omega = 2\pi f$ .



Рис. 5. Схема П-образной СФЦ

На основе выражения (8) находим матрицу частотно-зависимых *S*-параметров СФЦ

Доклады ТУСУРа, том 20, № 3, 2017

$$S_{C\Phi II} = 2(Y_{C\Phi II} - E)^{-1} - E$$
, (9)

где Е – единичная матрица.

Матрица S-параметров ФТЦ запишется [3]

$$\mathbf{S}_{\Phi T \amalg} = \begin{bmatrix} 0 & | \exp(-i\Theta) \\ \overline{\exp(-i\Theta)} & | & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где  $\Theta$  – значение фазы ФТЦ на заданной частоте.

Матрица *S*-параметров активного четырехполюсника, приведенного на рис. 4, запишется

$$\mathbf{S}_{A\Psi} = \left[\frac{S_{11A\Psi}}{S_{21A\Psi}} \mid \frac{S_{12A\Psi}}{S_{22A\Psi}}\right], \tag{11}$$

где  $S_{11A4}$ ,  $S_{12A4}$ ,  $S_{21A4}$ ,  $S_{22A4} - S$ -параметры, полученные на основе выражений, приведенных в [4], для каскадного соединения активного элемента с корректирующим двухполюсником  $Z_K$  на входе (5), СФЦ на выходе (9) и ФТЦ на входе и выходе (10).

Выражение для проводимости двухполюсника ОС с учетом выражение (11) запишется [2]

$$Y_{\rm OC} = \frac{2 S_{11\rm A\rm Y}}{(1 - S_{21\rm A\rm Y})(1 - S_{12\rm A\rm Y}) - S_{11\rm A\rm Y}S_{22\rm A\rm Y}} \,.$$
(12)

### Математическое моделирование корректирующего широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной ОС

Математическое моделирование корректирующего широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной ОС, принципиальная схема которого приведена на рис. 6, проведем на основе *S*-параметров транзистора КТ3115, рассчитанных в работе [2], по эквивалентной схеме транзистора КТ3115, приведенной в работе [5].



Рис. 6. Принципиальная схема корректирующего широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной ОС

По формулам (4а) находим значения элементов корректирующего двухполюсника *Z*<sub>K</sub>.

По выражению (5) определяем *S*-параметры каскадного соединения активного элемента с корректирующим двухполюсником *Z*<sub>K</sub> на входе.

Задавая значения аргумента  $\Theta_{12}$  в выражении (6) и подставляя полученное значение коэффициента отражения  $S_{11}$  в выражение (5), получим значения *S*-параметров СФЦ на заданной частоте. Переходя от *S*-параметров к *Y*-параметрам, находим значения элементов П-образной схемы СФЦ (8), а затем переходим от *Y*-параметров П-образной схемы СФЦ (8) к *S*-параметрам. Получаем частотно-зависимые *S*-параметры СФЦ (9).

Применяя выражения, приведенные в [4], для каскадного соединения активного элемента с корректирующим двухполюсником  $Z_{\rm K}$  на входе (5),

СФЦ на выходе (9) и ФТЦ на входе и выходе (10) и задавая значение  $\Theta$  ФТЦ, приближаем *S*-параметры активного элемента (см. рис. 4) матрицы (11) к требуемым *S*-параметрам активного четырехполюсника (1)–(3).

По выражению (12) уточняем структурную схему двухполюсника параллельной ОС.

В таблице приведены рассчитанные номиналы элементов  $Z_{\rm K}$ , СФЦ, ФТЦ, и  $Y_{\rm OC}$  принципиальной схемы корректирующего широкополосного усилителя с параллельной ОС, приведенной на рис. 6 для верхних частот 1,0 ГГц и начальных коэффициентов передачи 14 и 16 дБ и подъемом АЧХ 4 и 6 дБ соответственно и для верхних частот 3 ГГц с подъемом АЧХ 4,5 дБ.

Номиналы элементов Z<sub>K</sub>, СФЦ, ФТЦ, и Y<sub>OC</sub>

$F_{\rm B}, \Gamma \Gamma$ ц	ρ,	$C_1$ ,	<i>C</i> <sub>2</sub> ,	<i>L</i> ,	$R_{\rm OC}$ ,	$C_{\rm OC},$	$R_{\rm K}$ ,	Ск,
<i>S</i> <sub>210C</sub> , дБ	Ом Ю°	πФ	πФ	нΓ	Ом	пΦ	Ом	πФ
1,0	50	0,84	2,1	10,0	382	0,28	200	20
16-20	27							
1,0	50	0,85	1,19	7,64	336	0,26	421	8,9
14-20	40							
3,0	50	0,29	0,24	3,2	137	0,1	999	3
6-11	7							

На рис. 7, *а–г* приведены результаты моделирования корректирующих согласованных широкополосных усилителей с параллельной ОС для верхних частот 1,0 и 3 ГГц, показывающие возможность компенсации неравномерности АЧХ в пределах 4–6 дБ.





Доклады ТУСУРа, том 20, № 3, 2017



Рис. 7 (окончание). Коэффициент передачи (*a*); коэффициенты отражений (б) для верхней частоты 1,0 ГГц и коэффициент передачи (в); коэффициенты отражений (г) для верхней частоты 3,0 ГГц

Экспериментальная проверка аналогичных теоретических исследований была приведена автором в предыдущих статьях.

#### Полученные результаты

Получена структурная схема корректирующего широкополосного усилителя с параллельной ОС, приближающая S-параметры активного элемента к требуемым S-параметрам активного четырехполюсника для корректирующего широкополосного каскада с двухполюсником параллельной ОС.

Приведены результаты математического моделирования АЧХ корректирующих широкополосных усилителей на транзисторе КТ3115 на основе математической модели активного четырехполюсника для корректирующего широкополосного каскада с двухполюсником параллельной OC.

#### Литература

1. Якушевич Г.Н. Проектирование транзисторных широкополосных усилителей с двухполюсником параллельной обратной связи // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 1 (23). – С. 65–70.

2. Якушевич Г.Н. Проектирование транзисторных широкополосных усилителей с двухполюсниками параллельной и последовательной обратной связи // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 3 (37). – С. 62–66.

3. Фельдштейн А.Л. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Связь, 1971. – 388 с.

4. Силаев М.А. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ-устройств / М.А. Силаев, С.Ф. Брянцев. – М.: Сов. радио, 1979. – 247 с.

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

# Якушевич Геннадий Николаевич

Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, доцент каф. радиотехнических систем ТУСУРа Тел.: 41-37-09 Эл. почта: mrc@main.tusur.ru

#### Jakushevitch G.N.

# Design of wideband correcting amplifiers with two-pole parallel feedback

To compensate the uneven frequency response reception tracts are provided the results of corrective design Broadband Amplifiers based on mathematical model of the active four-pole with two-pole parallel feedback (FB).

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