

УДК 621.372:621.375

Г.Н. Якушевич

Математическая модель активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с четырехполюсником параллельной обратной связи

Получена математическая модель активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с четырехполюсником параллельной обратной связи (ОС) на основе заданных коэффициентов передачи, отражения активного четырехполюсника с ОС и параметров четырехполюсника параллельной обратной связи.

Ключевые слова: математическая модель, активный четырехполюсник, широкополосный усилитель, четырехполюсник параллельной ОС.

В работе [1] при разработке усилителя используется декомпозиционный метод синтеза (ДМС). ДМС предполагает, что требования к активному устройству предварительно преобразуются в требования к корректирующим и согласующим цепям (КЦ и СЦ), которые представляются в виде областей допустимых значений (ОДЗ) иммитанса или коэффициента отражения цепей на фиксированных частотах. Далее КЦ и СЦ синтезируются по указанным ОДЗ. В работах [2, 3] было показано, что прежде чем охватить активный элемент (транзистор) двухполюсником обратной связи, необходимо приблизить параметры активного элемента к требуемым параметрам активного четырехполюсника.

В работах [2, 3] были получены математические модели активных четырехполюсников для широкополосных усилителей с двухполюсниками параллельной и комбинированной ОС на основе требуемых параметров в виде следующей функциональной зависимости: $[S] = F([S_{OC}], [Y_{OC}])$. В работах [4–6] предложены алгоритмы моделирования и проектирования широкополосных усилителей на основе полученных математических моделей активного четырехполюсника. Показан выигрыш на верхней частоте в коэффициенте усиления широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной ОС по отношению к номинальному коэффициенту передачи по мощности [2–6]. Но выигрыш в коэффициенте передачи на верхней частоте уменьшается с уменьшением коэффициента передачи четырехполюсника с параллельной ОС, так как начинают влиять параметры двухполюсника параллельной ОС. Поэтому представляет интерес получение математической модели активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с четырехполюсником параллельной ОС в виде приведенной выше функциональной зависимости.

Постановка задачи. Математическую модель активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с четырехполюсником параллельной ОС найдем в виде аналитических выражений для требуемых параметров активного элемента без четырехполюсника параллельной ОС, рассчитанных по заданным коэффициентам передачи, отражения усилителя с ОС и структуры четырехполюсника параллельной ОС

Математическая модель. Определение математической модели активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с четырехполюсником параллельной ОС для схемы, приведенной на рис. 1, проведем в матричном виде. Для этого примем следующие обозначения:

$$[S_{OC}] = \begin{bmatrix} S_{11OC} & S_{12OC} \\ S_{21OC} & S_{22OC} \end{bmatrix}, [S_{AЧ}] = \begin{bmatrix} S_{11AЧ} & S_{12AЧ} \\ S_{21AЧ} & S_{22AЧ} \end{bmatrix}, [Y_{ЧOC}] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix},$$

это обобщенные матрицы параметров рассеяния широкополосного усилителя с четырехполюсником параллельной ОС, параметров рассеяния активного четырехполюсника и параметров четырехполюсника параллельной ОС.

Алгоритм нахождения матрицы требуемых параметров рассеяния активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с четырехполюсником параллельной ОС запишется в следующем виде [2]:

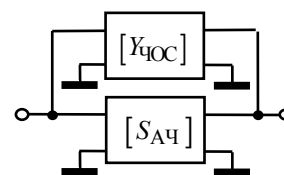


Рис. 1. Активный четырехполюсник с четырехполюсником параллельной ОС

$$[S_{Aч}] = 2 \left(2([S_{OC}] + [E])^{-1} - [Y_{чOC}] \right)^{-1} - [E], \quad (1)$$

где $[E]$ – единичная матрица.

Из выражения (1), с учетом введенных выше обозначений, получим математическую модель в виде аналитических выражений для требуемых S -параметров активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с ОС [7], при этом ошибочный ранее знак «+» перед последним слагаемым в числителе формулы (5) исправлен на знак «-»

$$S_{11Aч} = \frac{4S_{11OC} + 2[Y_{11}(S_{11OC} + 1) + Y_{22}(S_{22OC} + 1 - S_S OC) + Y_{12}S_{21OC} + Y_{21}S_{12OC}] - Y_Y S_S OC}{4 - 2[Y_{11}(S_{11OC} + 1) + Y_{22}(S_{22OC} + 1) + Y_{12}S_{21OC} + Y_{21}S_{12OC}] + Y_Y S_S OC}; \quad (2)$$

$$S_{12Aч} = \frac{2(2S_{12OC} + Y_{12} S_S OC)}{4 - 2[Y_{11}(S_{11OC} + 1) + Y_{22}(S_{22OC} + 1) + Y_{12}S_{21OC} + Y_{21}S_{12OC}] + Y_Y S_S OC}; \quad (3)$$

$$S_{21Aч} = \frac{2(2S_{21OC} + Y_{21} S_S OC)}{4 - 2[Y_{11}(S_{11OC} + 1) + Y_{22}(S_{22OC} + 1) + Y_{12}S_{21OC} + Y_{21}S_{12OC}] + Y_Y S_S OC}; \quad (4)$$

$$S_{22Aч} = \frac{4S_{22OC} + 2[Y_{11}(S_{11OC} + 1 - S_S OC) + Y_{22}(S_{22OC} + 1) + Y_{12}S_{21OC} + Y_{21}S_{12OC}] - Y_Y S_S OC}{4 - 2[Y_{11}(S_{11OC} + 1) + Y_{22}(S_{22OC} + 1) + Y_{12}S_{21OC} + Y_{21}S_{12OC}] + Y_Y S_S OC}, \quad (5)$$

где $Y_Y = Y_{11}Y_{22} - Y_{12}Y_{21}$, $S_S OC = (S_{11OC} + 1)(S_{22OC} + 1) - S_{12OC}S_{21OC}$.

Полученные соотношения (2)–(5) позволяют рассчитывать требуемые $S_{Aч}$ – параметры активного четырехполюсника для широкополосного усилителя на основе заданных коэффициентов прямой S_{21OC} и обратной S_{12OC} передачи, коэффициентов отражения S_{11OC} и S_{22OC} , заданных $Y_{чOC}$ -параметров четырехполюсника параллельной ОС.

Из полученного соотношения (3) найдем коэффициент обратной передачи S_{12OC} :

$$S_{12OC} = \frac{S_{12Aч} \{4 - 2[Y_{11}(S_{11OC} + 1) + Y_{22}(S_{22OC} + 1) + Y_{12}S_{21OC}] + Y_Y S_S OC\} - 2Y_{12} S_S OC}{S_{12Aч} (2Y_{21} + Y_Y S_{21OC}) + 4 - 2Y_{12} S_{21OC}}, \quad (6)$$

где $S_S OC = (S_{11OC} + 1)(S_{22OC} + 1)$.

Тогда с учетом выражения (6) соотношения (2), (4), (5) запишутся

$$S_{11Aч} = \frac{2S_{11OC} + Y_{11}(1 + S_{11OC}) + Y_{12}S_{21OC} + S_{12Aч}S_A}{2 - Y_{11}(1 + S_{11OC}) - Y_{12}S_{21OC}}; \quad (7)$$

$$S_{21Aч} = \frac{4S_{21OC} + 2Y_{21}(1 + S_{11OC})(1 + S_{22OC}) - 2Y_{12}S_{21OC}^2 + S_{12Aч}S_A S_B}{[2 - Y_{11}(1 + S_{11OC}) - Y_{12}S_{21OC}][2 - Y_{22}(1 + S_{22OC}) - Y_{12}S_{21OC}]}; \quad (8)$$

$$S_{22Aч} = \frac{2S_{22OC} + Y_{22}(1 + S_{22OC}) + Y_{12}S_{21OC} + S_{12Aч}S_B}{2 - Y_{22}(1 + S_{22OC}) - Y_{12}S_{21OC}}, \quad (9)$$

где $S_A = S_{21}Y_{22} + (S_{11} + 1)Y_{21}$, $S_B = S_{21}Y_{11} + (S_{22} + 1)Y_{21}$.

Полученные соотношения (7)–(9) определяют математическую модель активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с четырехполюсником ОС в виде аналитических выражений требуемых S -параметров активного четырехполюсника без четырехполюсника ОС.

Задавая значения коэффициентов отражения S_{11OC} , S_{22OC} и значение комплексного коэффициента передачи S_{21OC}^* широкополосного усилителя с ОС в виде $S_{21OC}^* = |S_{21OC}| \exp(i \Theta_{21OC})$, где $|S_{21OC}|$ и Θ_{21OC} – модуль и фаза комплексного коэффициента передачи, для заданной структуры четырехполюсника ОС по соотношениям (7)–(9) можно рассчитать требуемые S -параметры активного четырехполюсника без четырехполюсника ОС.

Требуемые S -параметры идеально однонаправленного активного четырехполюсника для согласованного широкополосного усилителя с четырехполюсником параллельной ОС. Для идеально однонаправленного активного четырехполюсника $S_{12Aч} = 0$, а для согласованного широко-

полосного усилителя $S_{11OC} = S_{22OC} = 0$. Тогда согласно (7)–(9) требуемые S -параметры и номинальный коэффициент передачи по мощности $G_{НОМ}$ определяются выражениями:

$$S_{12OC} = \frac{Y_{12}}{2 + Y_{12} S_{21OC}}; \tag{10}$$

$$S_{11AЧ} = \frac{Y_{11} + Y_{12} S_{21OC}}{2 - Y_{11} - Y_{12} S_{21OC}}; \tag{11}$$

$$S_{21AЧ} = \frac{2(2S_{21OC} + Y_{21} - Y_{12} S_{21OC}^2)}{(2 - Y_{11} - Y_{12} S_{21OC})(2 - Y_{22} - Y_{12} S_{21OC})}; \tag{12}$$

$$S_{22AЧ} = \frac{Y_{22} + Y_{12} S_{21OC}}{2 - Y_{22} - Y_{12} S_{21OC}}; \tag{13}$$

$$G_{НОМ} = |S_{21AЧ}|^2 / [(1 - |S_{11AЧ}|^2)(1 - |S_{22AЧ}|^2)]. \tag{14}$$

На рис. 2 приведены зависимости модулей коэффициентов передачи $|S_{21AЧ}|$, $|S_{21OC}|$ и коэффициентов передачи по мощности $G_{НОМ}$ для активного четырехполюсника с однонаправленными четырехполюсниками OC ($Y_{11} = Y_{22} = Y_{12} = 0$) R -типа, RL -типа, RC -типа [2, 3] для коэффициента передачи широкополосного усилителя $|S_{21OC}| = 6$ дБ от фазы коэффициента передачи $\Theta_{21OC AЧ}$.

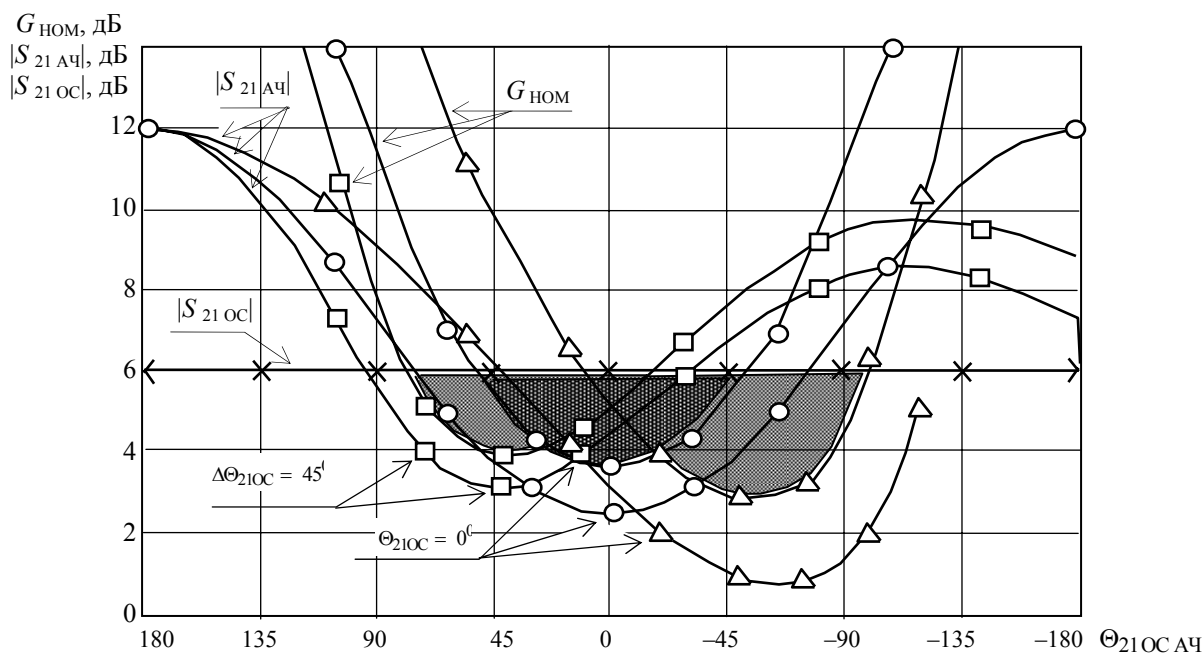


Рис. 2. Зависимости модулей коэффициентов передачи $|S_{21AЧ}|$, $|S_{21OC}|$ и коэффициентов передачи по мощности $G_{НОМ}$ для активного четырехполюсника с однонаправленными четырехполюсниками OC: \circ – R -типа; \square – RL -типа; \triangle – RC -типа от фазы коэффициента передачи $\Theta_{21OC AЧ}$

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 2, показывает, что в областях ниже коэффициента передачи для каскада широкополосного усилителя с OC $|S_{21OC}| = 6$ дБ получается выигрыш по коэффициенту усиления и по верхней граничной частоте по отношению к номинальному коэффициенту передачи по мощности активного элемента (см. заштрихованные области). Для активного четырехполюсника с однонаправленными четырехполюсниками OC RL -типа выигрыш составляет 2,16 дБ, R -типа – 2,5 дБ, RC -типа – 3,15 дБ.

Приведенные в табл. 1 значения выигрыша коэффициентов передачи $|S_{21OC}|$ активного четырехполюсника с R -двухполюсником OC и с однонаправленным R -четырёхполюсником OC показывают, что с уменьшением коэффициента передачи $|S_{21OC}|$ активного четырехполюсника с R -двухполюсником OC величина выигрыша уменьшается, а для активного четырехполюсника с однонаправленным R -четырёхполюсником OC остается постоянной.

Таблица 1

**Выигрыш в коэффициенте передачи $|S_{21OC}|$ активного
четырёхполюсника с R -двухполюсником ОС
и с однонаправленным R -четырёхполюсником ОС**

$ S_{21OC} $, дБ	6	12	20
Выигрыш с R -двухполюсником ОС, дБ	0,56	1,29	1,97
Выигрыш с однонаправленным R -четырёхполюсником ОС, дБ	2,5	2,5	2,5

В общем случае зависимости S -параметров активного элемента отличаются от требуемых S -параметров активного четырёхполюсника, приведенных на рис. 2, и для их сближения на входе и выходе активного элемента включают фазирово-трансформирующие цепи (ФТЦ), фазирово-согласующие цепи (ФСЦ), симметрирующие цепи (СЦ) [2–6].

Математическое моделирование широкополосного усилителя с однонаправленным R -четырёхполюсником ОС. Математическое моделирование проведем на основе, приведенной на рис. 3 эквивалентной схемы кристалла [8], отражающей в широком диапазоне частот частотные свойства полевого транзистора по алгоритму проектирования, предложенному в работе [5].

Принципиальная схема широкополосного усилителя на полевом транзисторе $VT1$ с четырёхполюсником ОС на основе схемы каскода общий сток ($VT2$) – общий затвор ($VT3$) приведена на рис. 4. СЦ на выходе и индуктивность в истоке приближают S -параметры полевого транзистора $VT1$ к требуемым параметрам активного четырёхполюсника, приведенным на рис. 1. Значения элементов эквивалентной схемы полевых транзисторов $VT1$, $VT2$, $VT3$ приведены в табл. 2.

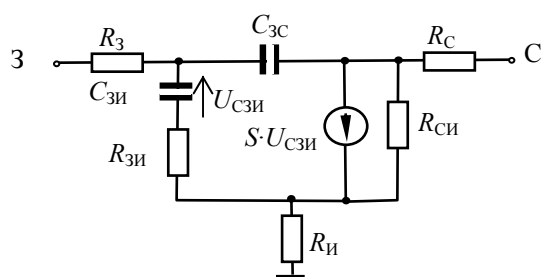


Рис. 3. Эквивалентная схема кристалла полевого транзистора

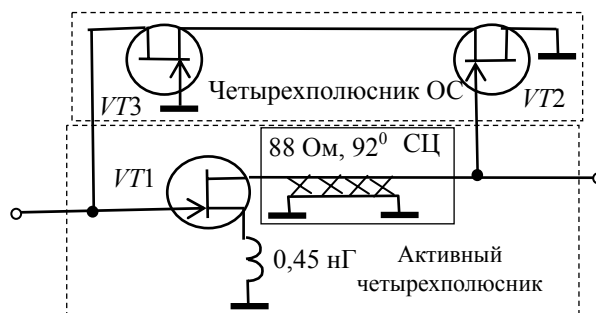


Рис. 4. Принципиальная схема широкополосного усилителя с четырёхполюсником ОС

Таблица 2

Значения элементов эквивалентной схемы полевых транзисторов

Параметры	$R_{зи}$, Ом	$R_{си}$, Ом	$C_{3и}$, пФ	$C_{3с}$, пФ	S , А/В	R_3 , Ом	$R_с$, Ом	$R_{и}$, Ом
Полевого транзистора $VT1$	5	400	1	0,01	0,06	2	2	2
Полевого транзистора ОС $VT2, VT3$	20	1600	0,25	0,0025	0,015	8	8	8

На рис. 5 приведены результаты расчета S -параметров широкополосного усилителя с четырёхполюсником ОС на основе схемы каскода общий сток ($VT2$) – общий затвор ($VT3$). Результаты математического моделирования показывают выигрыш в коэффициенте усиления по отношению к номинальному коэффициенту передачи по мощности на частоте 8 ГГц порядка 2 дБ (см. рис. 5, а).

В работах [1, 2] приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие достоверность аналогичных теоретических исследований с помощью математического моделирования на основе эквивалентных схем активных элементов.

Полученные результаты. Определены алгоритмическая математическая модель в виде выражения (1) и аналитическая математическая модель в виде выражений (7)–(9) для требуемых параметров активного четырёхполюсника для широкополосного усилителя с четырёхполюсником ОС, к которым необходимо приблизить параметры активного элемента, прежде чем ввести четырёхполюсник ОС.

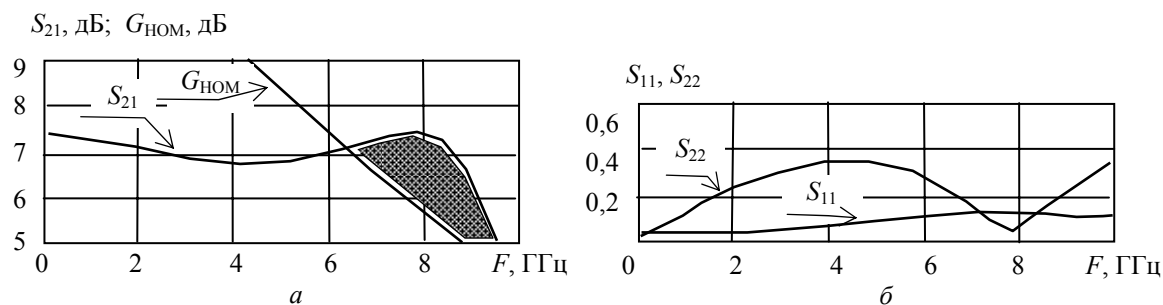


Рис. 5. Коэффициенты S_{21} и $G_{\text{ном}}$ (а), S_{11} и S_{22} (б) широкополосного усилителя с четырехполюсником ОС

Литература

1. Разработка GaAs-pHEMT-монокристаллического малошумящего усилителя диапазона 3–20 ГГц с использованием программ «визуального» проектирования / И.М. Добуш, А.А. Самуилов, А.А. Калентьев и др. // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – № 4 (30). – С. 39–44.
2. Якушевич Г.Н. Математическая модель активного четырехполюсника для широкополосного СВЧ-усилителя с двухполюсником параллельной обратной связи // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – №2 (20). – С. 32–37.
3. Якушевич Г.Н. Математическая модель активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с двухполюсниками комбинированной обратной связи // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – №1 (25). – С. 34–39.
4. Якушевич Г.Н. Алгоритм расчета транзисторного широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной обратной связи // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – №1 (21), ч. 2. – С. 63–68.
5. 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.
6. Якушевич Г.Н. Алгоритм расчета транзисторного широкополосного усилителя с двухполюсниками комбинированной обратной связи // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – № 1 (27). – С. 28–33.
7. Jakushevitch G.N. A Model of the Active Four-port for the Wide Band UHF Amplifier with the Parallel Feedback Two-Port // The third International Symposium «Appfication of the Conversion Research Results for International Cooperation» (SIBKONVERS'99). Proceedings. – Tomsk: Tomsk State University of Conrol Systems and Radioelectronics, 1999. – P. 161–162.
8. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: пер. с англ.; в 2 кн. – Кн. 1. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

Якушевич Геннадий Николаевич

Канд. техн. наук, доцент каф. средств радиосвязи ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-37-09

Эл. почта: mrc@main.tusur.ru

Jakushevitch G.N.

A mathematical model of an active four-pole network for a wideband amplifier with four-port parallel feedback

The paper describes a math model of an active four-port network for a wideband amplifier with four-port parallel feedback (FB). The model is built to provide the necessary transfer coefficient and reflection coefficients of the system after introduction the feedback. The feedback four-port parameters are specified.

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