

УДК 621.372:621.375

Г.Н. Якушевич

## Математическая модель активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с двухполюсниками комбинированной обратной связи

Получена математическая модель активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с двухполюсниками комбинированной обратной связи на основе заданных коэффициентов передачи, отражения и структуры двухполюсников комбинированной обратной связи (ОС). Получена обобщенная структурная схема активного четырехполюсника, представленного активным элементом, на входе и выходе которого включены фазировочно-трансформирующие цепи (ФТЦ) и симметрирующие цепи (СЦ).

**Ключевые слова:** математическая модель, активный четырехполюсник, широкополосный усилитель, двухполюсник, комбинированная ОС.

В настоящее время современные технологии позволяют на этапах проектирования и разработки получить требуемые параметры активных элементов (транзисторов). Поэтому актуальной задачей является определение требуемых параметров активных элементов для широкополосных усилителей с двухполюсниками ОС.

В работе [1] была получена математическая модель активного четырехполюсника для широкополосного СВЧ-усилителя с двухполюсником параллельной обратной связи и показано, что прежде, чем ввести параллельную ОС, необходимо приблизить параметры активного элемента к требуемым параметрам активного четырехполюсника без параллельной ОС.

**Постановка задачи.** Определение в виде аналитических выражений математической модели активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с двухполюсниками комбинированной ОС, на основе которых по заданным коэффициентам передачи, отражения и структуре двухполюсников комбинированной ОС рассчитываются требуемые параметры активного элемента без двухполюсников комбинированной ОС.

**Математическая модель.** Определение математической модели активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с двухполюсниками комбинированной ОС (рис. 1) проведем в матричном виде. Для этого примем следующие обозначения:

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

$$[Y_{ДОС}] = \begin{bmatrix} Y_{OC} & -Y_{OC} \\ -Y_{OC} & Y_{OC} \end{bmatrix}; [Z_{ДОС}] = \begin{bmatrix} Z_{OC} & Z_{OC} \\ Z_{OC} & Z_{OC} \end{bmatrix}; [E] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $[S_{OC}]$ ,  $[S_{AЧ}]$ ,  $[Y_{ДОС}]$ ,  $[Z_{ДОС}]$ ,  $[E]$  – матрицы параметров рассеяния широкополосного усилителя с комбинированной ОС и активного четырехполюсника, матрица проводимости двухполюсника параллельной ОС, матрица сопротивлений последовательной ОС и единичная матрица.

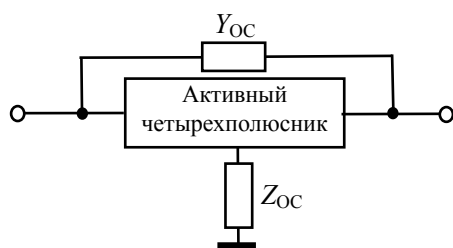


Рис. 1. Активный четырехполюсник с двухполюсниками комбинированной ОС

Считая матрицу  $[S_{OC}]$  заданной, перейдем на основе соотношений перехода от  $S$ -параметров к  $Y$ -параметрам – от матрицы  $[S_{OC}]$  к матрице проводимости широкополосного каскада с комбинированной ОС и вычтем из полученной матрицы проводимости матрицу проводимости двухполюсника параллельной ОС  $[Y_{OC}]$ , затем на основе соотношений перехода от  $Y$ -параметров к  $Z$ -параметрам, перейдем к матрице сопротивлений, из которой вычтем матрицу сопротивлений двухполюсника последовательной ОС  $[Z_{OC}]$  и на основе соотношений перехода от  $Z$ -пара-

метров к  $S$ -параметрам запишем в матричном виде алгоритм определения матрицы рассеяния активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с комбинированной ОС:

$$[S_{AЧ}] = -(2 \left( (2 \left( [S_{OC}] + [E] \right)^{-1} - [E] - [Y_{OC}] \right)^{-1} - [Z_{OC}] + [E] \right)^{-1} - [E]). \quad (1)$$

Из выражения (1), с учетом введенных выше обозначений, получим аналитические выражения для требуемых параметров активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с комбинированной ОС:

$$S_{11 AЧ} = \frac{2 S_{11 OC} + (Y_{OC} - Z_{OC}) S_A}{2 + (Y_{OC} + Z_{OC}) S_B - (Y_{OC} - Z_{OC}) S_C + 2 Y_{OC} Z_{OC} S_A}; \quad (2)$$

$$S_{12 AЧ} = \frac{2 S_{12 OC} + (Y_{OC} + Z_{OC}) S_D - (Y_{OC} - Z_{OC}) S_C + 2 Y_{OC} Z_{OC} S_A}{2 + (Y_{OC} + Z_{OC}) S_B - (Y_{OC} - Z_{OC}) S_C + 2 Y_{OC} Z_{OC} S_A}; \quad (3)$$

$$S_{21 AЧ} = \frac{2 S_{21 OC} + (Y_{OC} + Z_{OC}) S_D - (Y_{OC} - Z_{OC}) S_C + 2 Y_{OC} Z_{OC} S_A}{2 + (Y_{OC} + Z_{OC}) S_B - (Y_{OC} - Z_{OC}) S_C + 2 Y_{OC} Z_{OC} S_A}; \quad (4)$$

$$S_{22 AЧ} = \frac{2 S_{22 OC} + (Y_{OC} - Z_{OC}) S_A}{2 + (Y_{OC} + Z_{OC}) S_B - (Y_{OC} - Z_{OC}) S_C + 2 Y_{OC} Z_{OC} S_A}; \quad (5)$$

где  $S_A = (S_{12 OC} - 1)(S_{21 OC} - 1) - S_{11 OC} S_{22 OC}$ ,  $S_B = S_{21 OC} + S_{12 OC} - 2$ ;

$$S_C = S_{11 OC} + S_{22 OC}, \quad S_D = S_{12 OC} S_{21 OC} - S_{11 OC} S_{22 OC} - 1.$$

Полученные соотношения (2)–(5) позволяют рассчитывать требуемые  $S$ -параметры активного четырехполюсника для широкополосного усилителя на основе заданных коэффициентов прямой  $S_{21 OC}$  и обратной  $S_{12 OC}$  передачи, коэффициентов отражения по входу и выходу  $S_{11 OC}$  и  $S_{22 OC}$ , заданной структуры двухполюсников  $Y_{OC}$  и  $Z_{OC}$  параллельной и последовательной ОС.

Коэффициент обратной передачи  $S_{12 OC}$  удобнее не задавать, а рассчитать из полученного соотношения (3) с учетом  $S_{12}$  на основе заданных значений  $S_{21 OC}$ ,  $S_{11 OC}$ ,  $S_{22 OC}$ ,  $Y_{OC}$  и  $Z_{OC}$  по следующему выражению:

$$S_{12 OC} = \frac{(Y_{OC} + Z_{OC})(1 + S_{11 OC} S_{22 OC}) + (Y_{OC} - Z_{OC}) S_C + 2 Y_{OC} Z_{OC} (S_{21 OC} + S_{11 OC} S_{22 OC} - 1) - S_{12 AЧ} S_E}{2 + (Y_{OC} + Z_{OC}) S_{21 OC} + 2 Y_{OC} Z_{OC} (S_{21 OC} - 1) - S_{12 AЧ} S_F}, \quad (6)$$

где  $S_E = (Y_{OC} + Z_{OC})(2 - S_{21 OC}) + (Y_{OC} - Z_{OC}) S_C + 2 Y_{OC} Z_{OC} (S_{21 OC} + S_{11 OC} S_{22 OC} - 1) - 2$ ,

$$S_F = Y_{OC} + Z_{OC} + 2 Y_{OC} Z_{OC} (S_{21 OC} - 1).$$

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

$$S_{11 AЧ} = \frac{2 S_{11 OC} + [Y_{OC} (S_{11 OC} + 1 - S_{21 OC}) + Z_{OC} (S_{11 OC} - 1 + S_{21 OC})] (1 - S_{12 AЧ})}{2 - Y_{OC} (S_{11 OC} + 1 - S_{21 OC}) + Z_{OC} (S_{11 OC} - 1 + S_{21 OC})}; \quad (7)$$

$$S_{21 AЧ} = \frac{4 S_{21 OC} - 2 Y_{OC} S_G - 2 Z_{OC} S_H - 4 Y_{OC} Z_{OC} S_K + S_{12 AЧ} S_L}{(2 - (Y_{OC} + Z_{OC})(1 + S_{11 OC} - S_{21 OC})) (2 - (Y_{OC} + Z_{OC})(1 + S_{22 OC} - S_{21 OC}))}; \quad (8)$$

$$S_{22 AЧ} = \frac{2 S_{22 OC} + [Y_{OC} (S_{22 OC} + 1 - S_{21 OC}) + Z_{OC} (S_{22 OC} - 1 + S_{21 OC})] (1 - S_{12 AЧ})}{2 - Y_{OC} (S_{22 OC} + 1 - S_{21 OC}) + Z_{OC} (S_{22 OC} - 1 + S_{21 OC})}, \quad (9)$$

где

$$S_G = (1 + S_{11 OC})(1 + S_{22 OC}) - S_{21 OC}^2; \quad S_H = (1 - S_{11 OC})(1 - S_{22 OC}) - S_{21 OC}^2; \quad S_K = S_{11 OC} S_{22 OC} - (1 - S_{21 OC})^2;$$

$$S_L = [(Y_{OC} + Z_{OC}) S_{11 OC} + (Y_{OC} - Z_{OC})(1 - S_{21 OC})] [(Y_{OC} + Z_{OC}) S_{22 OC} + (Y_{OC} - Z_{OC})(1 - S_{21 OC})].$$

Полученные соотношения (7)–(9) определяют математическую модель в виде аналитических выражений для требуемых параметров активного четырехполюсника для каскада широкополосного усилителя с двухполюсниками комбинированной ОС.

Задавая значения  $S_{11 OC}$ ,  $S_{22 OC}$ ,  $S_{21 OC}$ ,  $Y_{OC}$  и  $Z_{OC}$  для заданной структуры двухполюсников комбинированной ОС, по соотношениям (7)–(9) можно рассчитать требуемые  $S$ -параметры активного четырехполюсника без двухполюсников комбинированной ОС.

### Требуемые $S$ -параметры идеально однонаправленного активного четырехполюсника для согласованного широкополосного усилителя с двухполюсниками комбинированной ОС

Для идеально однонаправленного активного четырехполюсника  $S_{12АЧ}=0$ , а для согласованного широкополосного усилителя  $S_{11ОС}=S_{22ОС}=0$ . Тогда согласно (7)-(9) требуемые  $S$ -параметры и номинальный коэффициент передачи по мощности  $G_{НОМ}$  определяются выражениями:

$$S_{11АЧ}=S_{22АЧ}=\frac{(Y_{ОС}-Z_{ОС})(1-S_{21ОС})}{2-(Y_{ОС}+Z_{ОС})(1-S_{21ОС})}, \quad (10)$$

$$S_{21АЧ}=\frac{4S_{21ОС}-2(Y_{ОС}+Z_{ОС})(1-S_{21ОС}^2)+4Y_{ОС}Z_{ОС}(1-S_{21ОС})^2}{[2-(Y_{ОС}+Z_{ОС})(1-S_{21ОС})]^2}. \quad (11)$$

$$G_{НОМАЧ}=|S_{21АЧ}|^2/(1-|S_{11АЧ}|^2)^2. \quad (12)$$

Полученная математическая модель активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с комбинированной ОС позволяет определить требуемые  $S$ -параметры для любой заданной структуры двухполюсников комбинированной ОС и заданных параметров широкополосного усилителя. При условии  $Y_{ОС}=0$  или  $Z_{ОС}=0$  соотношения (10)–(12) определяют требуемые параметры однонаправленного активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с двухполюсником параллельной или последовательной ОС [1].

Из (10) следует, что при условии  $Y_{ОС}=Z_{ОС}$  требуемые коэффициенты отражения по входу и выходу однонаправленного активного четырехполюсника для согласованного широкополосного усилителя с двухполюсниками комбинированной ОС  $S_{11АЧ}=S_{22АЧ}=0$  и  $S_{21АЧ}(\text{дБ})=G_{НОМ}(\text{дБ})$ .

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

$$|S_{21ОС}(f)|=\text{const} \text{ и } \Theta_{21ОС}=\arg S_{21ОС}(f)=180^\circ \cdot (1-f/f_B), \quad (13)$$

где  $f$  – текущая частота;  $f_B$  – частота нормировки; задавая значение коэффициента передачи в виде  $S_{21ОС}=|S_{21ОС}|\exp(i\Theta_{21ОС})$  для заданных структур двухполюсников комбинированной ОС по соотношениям (10)–(12), можно рассчитать требуемые  $S$ -параметры активного четырехполюсника без двухполюсником комбинированной ОС.

Для  $R$ -двухполюсников комбинированной ОС проводимость параллельной ОС и сопротивление последовательной ОС определим из выражения

$$Y_{ОСР}=Z_{ОСР}=1/(1+|S_{21ОС}|); \quad (14)$$

для последовательного  $RL$ -двухполюсника проводимость параллельной ОС и параллельного  $RC$ -двухполюсника последовательной ОС находим

$$Y_{ОСRL}=Z_{ОСRC}=Y_{ОСР}/[1+j \cdot (1-\Theta_{21ОС}/180^\circ)]; \quad (15)$$

для параллельного  $RC$ -двухполюсника проводимость параллельной ОС и последовательного  $RL$ -двухполюсника последовательной ОС находим

$$Y_{ОСRC}=Z_{ОСRL}=Y_{ОСР} \cdot [1+j \cdot (1-\Theta_{21ОС}/180^\circ)]. \quad (16)$$

Результаты расчета требуемого коэффициента передачи однонаправленного активного четырехполюсника для двухполюсников комбинированной ОС, рассчитанные на основе выражений (14)–(16) для коэффициента передачи широкополосного усилителя  $|S_{21ОС}|=12$  дБ и  $\Theta_{21ОС}=180^\circ, 135^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, -90^\circ, -135^\circ, -180^\circ$ , приведены в табл. 1–3.

Таблица 1

$|S_{21}|, \Theta_{21}$  активного четырехполюсника для двухполюсников  $Y_{ОСР}$  и  $Z_{ОСР}$  комбинированной ОС

$\Theta_{21ОС}, ^\circ$	180	135	90	45	0	-45	-90	-135	-180
$ S_{21} , \text{дБ}$	>90	18,1	12,6	10,0	9,2	10,0	12,6	18,1	>90
$\Theta_{21}, ^\circ$	90	69,1	47,4	25,2	0	-25,2	-47,4	-69,1	-90

Таблица 2

$|S_{21}|$ ,  $\Theta_{21}$  активного четырехполюсника для двухполюсников  $Y_{OCRL}$  и  $Z_{OCRC}$  комбинированной ОС

$\Theta_{21OC}, ^\circ$	180	135	90	45	0	-45	-90	-135	-180
$ S_{21} , \text{дБ}$	>90	15,5	10,8	9,4	10,2	12,9	17,0	17,0	13,5
$\Theta_{21}, ^\circ$	90	74,0	56,2	35,0	9,0	-25,4	-80,8	-159,6	148

Таблица 3

$|S_{21}|$ ,  $\Theta_{21}$  активного четырехполюсника для двухполюсников  $Y_{OCRC}$  и  $Z_{OCRL}$  комбинированной ОС

$\Theta_{21OC}, ^\circ$	180	135	90	45	0	-45	-90	-135	-180
$ S_{21} , \text{дБ}$	>90	22,1	15,4	11,2	8,7	7,4	7,1	7,5	8,6
$\Theta_{21}, ^\circ$	90	63,3	37,0	11,2	-13,1	-34,0	-50,2	-61,5	-68,2

Полученные результаты показывают, что максимальный выигрыш в коэффициенте передачи  $S_{21OC}$  широкополосного усилителя с двухполюсниками комбинированной ОС по отношению к коэффициенту прямой передачи  $S_{21}$  активного четырехполюсника за счет положительной ОС при идеальном согласовании получается с  $Y_{OCR}$  и  $Z_{OCR}$  двухполюсниками комбинированной ОС при  $\Theta_{21OC} = 0$  (см. табл. 1), с  $Y_{OCRL}$  и  $Z_{OCRC}$  двухполюсниками комбинированной ОС при  $\Theta_{21OC} > 0$  (см. табл. 2), т. е. увеличение задержки по фазе в цепи ОС приводит к уменьшению требуемого значения фазы по цепи прямого усиления, с  $Y_{OCRC}$  и  $Z_{OCRL}$  двухполюсниками комбинированной ОС при  $\Theta_{21OC} < 0$  (см. табл. 3), т. е. уменьшение задержки по фазе в цепи ОС приводит к увеличению требуемого значения фазы по цепи прямого усиления.

В общем случае зависимости параметров активного элемента отличаются от требуемых параметров активного четырехполюсника приведенных в табл. 1-3 и для их сближения на входе и выходе активного элемента необходимо включать ФТЦ и СЦ [2, 3]. Обобщенная структурная схема широкополосного усилителя с двухполюсниками комбинированной ОС на основе активного элемента с ФТЦ и СЦ на входе и выходе, образующими активный четырехполюсник, представлена на рис. 2.

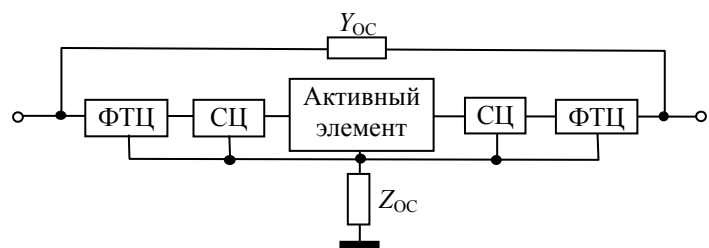


Рис. 2. Обобщенная структурная схема широкополосного усилителя с двухполюсниками комбинированной ОС

**Математическое моделирование широкополосного усилителя с комбинированной ОС.** Математическое моделирование проведем на основе приведенной на рис. 3 эквивалентной схемы кристалла, отражающей в широком диапазоне частот частотные свойства биполярного транзистора.

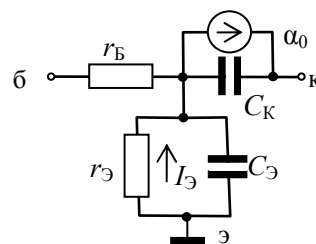


Рис. 3. Эквивалентная схема кристалла биполярного транзистора

Максимальная частота генерации кристалла биполярного транзистора на основе данной эквивалентной схемы определяется выражением

$$f_{\max} \approx \sqrt{\alpha_0 \omega_T / \tau_K} / 4\pi, \tag{17}$$

где  $\omega_T = 2\pi f_T = 1 / (r_E C_E)$ ;  $\omega_T$  – круговая граничная частота;  $f_T$  – граничная частота, на которой коэффициент передачи по току схемы с общим эмиттером равен 1;  $\alpha_0$  – коэффициент передачи по току схемы с общей базой;  $r_E = 25,6 \text{ [мВ]} / I_E \text{ [мА]}$  – сопротивление эмиттера для данного значения тока  $I_E$ ,  $C_E$  – емкость эмиттерного перехода;  $\tau_K = r_B C_K$  – постоянная времени коллекторного перехода;  $r_B$  – сопротивление базы;  $C_K$  – емкость коллекторного перехода.

Из выражения (17) следует, что при сохранении условия  $\omega_T/\tau_K = \text{const}$  максимальная частота генерации для различных значений сопротивления базы тоже будет оставаться постоянной. При этом на высоких частотах реальные составляющие входного  $\text{Re}(Z_{\text{ВХ}})$  и выходного сопротивлений  $\text{Re}(Z_{\text{ВЫХ}})$  приближенно определяются из следующих выражений:

$$\text{Re}(Z_{\text{ВХ}}) \approx r_B, \text{Re}(Z_{\text{ВЫХ}}) \approx r_B \omega_T \tau_K. \quad (18)$$

На рис. 4–6 приведены принципиальные схемы и результаты расчета  $S$ -параметров для различных эквивалентных схем кристалла транзистора из табл. 4 и тока эмиттера  $I_E = 50$  мА. Номиналы элементов ФТЦ, СЦ и  $Y_{\text{ОС}}$  рассчитаны по соотношениям, приведенным в [1–3].

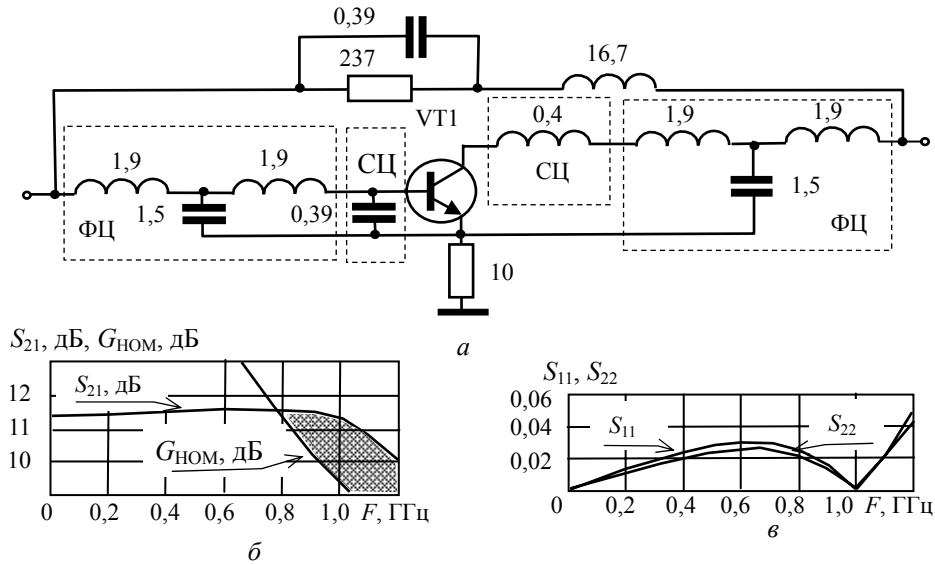


Рис. 4. Принципиальная схема (а), коэффициенты  $S_{21}$  (б),  $S_{11}$  и  $S_{22}$  (в) для кристалла типа VT1

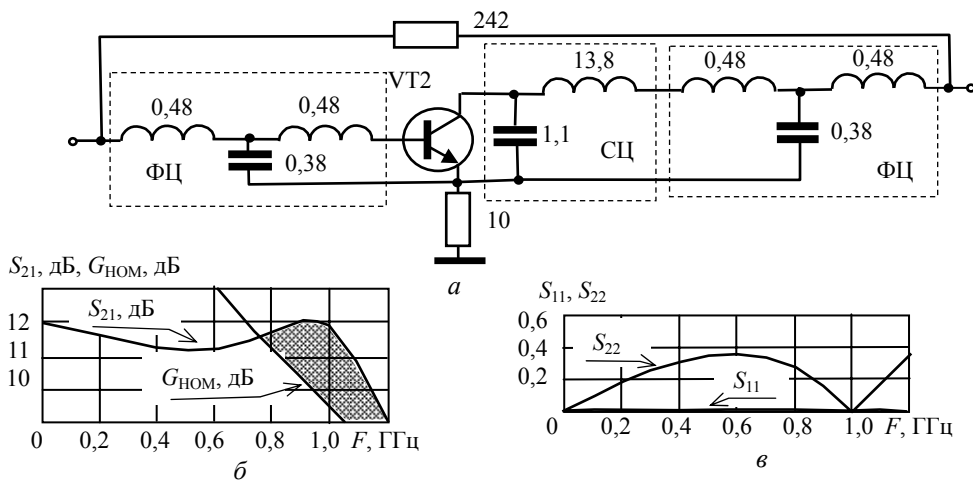


Рис. 5. Принципиальная схема (а), коэффициенты  $S_{21}$  (б),  $S_{11}$  и  $S_{22}$  (в) для кристалла типа VT2

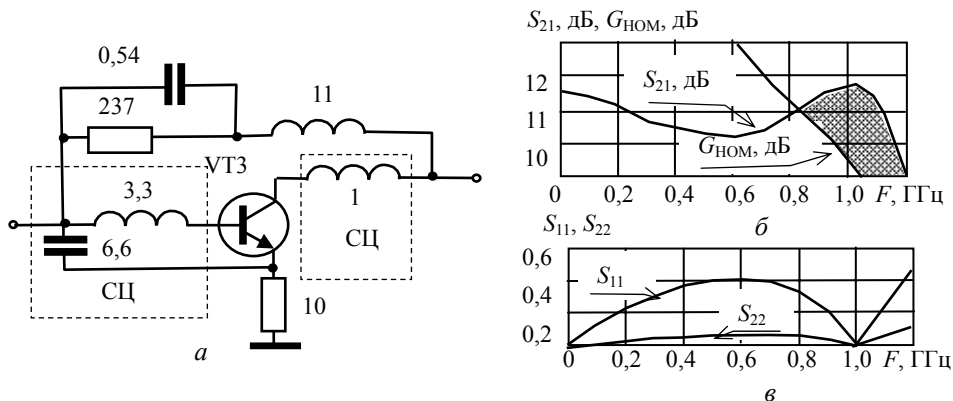


Рис. 6. Принципиальная схема (а), коэффициенты  $S_{21}$  (б),  $S_{11}$  и  $S_{22}$  (в) для кристалла типа VT3

Результаты расчетов показывают, что чем точнее приближены  $S$ -параметры кристалла транзистора (см. табл. 4) к требуемым параметрам активного четырехполосника (см. табл. 1–3), тем равномернее частотная зависимость коэффициента передачи и меньше коэффициенты отражения широкополосного усилителя с комбинированной ОС (см. рис. 4, б, в). Отклонение от требуемых  $S$ -параметров приводит к появлению неравномерности коэффициента передачи и увеличению коэффициента отражения на средних частотах (см. рис. 5, б, в и рис. 6, б, в).

Таблица 4

**Параметры элементов эквивалентной схемы кристалла транзистора и  $S$ -параметры на частоте 1 ГГц**

Тип	$f_{\max}$ , ГГц	$\omega_{\Gamma\tau_K}$	$r_B$ , Ом	$Z_{ВХ}$ , Ом	$Z_{ВЫХ}$ , Ом	$S_{11}$	$S_{12}$ , дБ	$S_{21}$ , дБ	$S_{22}$
VT1	3	1	50	$50-1,6i$	$49-10i$	$0,016/-84^0$	$-45,8/-3,5^0$	$9,4/86^0$	$0,10/-91^0$
VT2	3	0,25	50	$50-1,2i$	$180-63i$	$0,012/-88^0$	$-53,7/-2,5^0$	$7,5/87^0$	$0,61/-11^0$
VT3	3	0,25	12,5	$12,6-0,8i$	$45-16i$	$0,6/-178^0$	$-42,0/-8,2^0$	$7,4/81^0$	$0,18/-97^0$

Экспериментальная проверка аналогичных теоретических исследований и математического моделирования была приведена автором в предыдущих статьях [1–3].

**Полученные результаты:**

– определена математическая модель активного четырехполосника для широкополосного усилителя с двухполосниками комбинированной ОС в виде аналитических выражений (10)–(12), на основе которых рассчитываются требуемые  $S$ -параметры активного четырехполосника, к которым необходимо приблизить параметры активного элемента, прежде чем ввести двухполосники комбинированной ОС;

– получена обобщенная структурная схема широкополосного усилителя с двухполосниками комбинированной ОС, представленного активным элементом, на входе и выходе которого включены ФТЦ и СЦ;

– приведены результаты математического моделирования широкополосных усилителей с комбинированной ОС для различных значений сопротивления базы  $r_B$  и произведения  $\omega_{\Gamma\tau_K}$  эквивалентной схемы кристалла транзистора при постоянной максимальной частоте генерации  $f_{\max}$ , при этом на верхних частотах получается выигрыш в коэффициенте передачи по отношению к номинальному коэффициенту передачи по мощности за счет положительной ОС (см. рис. 4, б – 6, б, заштрихованные области).

*Литература*

1. Якушевич Г.Н. Математическая модель активного четырехполосника для широкополосного СВЧ-усилителя с двухполосником параллельной обратной связи // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – №2 (20). – С. 32–37.

2. Якушевич Г.Н. Алгоритм расчета транзисторного широкополосного усилителя с двухполосником параллельной обратной связи // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – №1 (21), ч. 2. – С. 63–68.

3. Якушевич Г.Н. Проектирование транзисторных широкополосных усилителей с двухполосником параллельной обратной связи // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – №1 (23). – С. 65–70.

**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-port device for a wideband amplifier with the two-port serial and parallel feedback**

There are given a mathematical model of an active four-port device for a wideband amplifier on a basis of provided forward coefficients, reflection coefficients and the structure of the combinatory feedback two-port. There is also given the structure circuit of the active four-port described by the active element with phase-forming and providing symmetry circuits at the input and output.

**Keywords:** Mathematical model, active four-port device, wideband amplifier, serial and parallel feedback two-port.