

УДК 621.372:621.375

Г.Н. Якушевич

Алгоритм расчета транзисторного широкополосного усилителя с двухполосниками комбинированной обратной связи

Предложен алгоритм расчета транзисторного широкополосного усилителя на основе математической модели активного четырехполосника для широкополосного усилителя с двухполосниками комбинированной обратной связи (ОС). Предложена обобщенная структурная схема активного четырехполосника, представленного активным элементом, на входе и выходе которого включены фазированно-согласующие цепи (ФСЦ).

Ключевые слова: алгоритм, математическая модель, активный четырехполосник, широкополосный усилитель, двухполосник, комбинированная ОС.

В работе [1] было показано, что при использовании простейших структур цепей двухполосников комбинированной ОС необходимо с помощью фазированно-трансформирующих цепей (ФТЦ) и симметрирующих цепей (СЦ), включенных на входе и выходе активного элемента, приблизить параметры активного элемента к требуемым параметрам активного четырехполосника для каскада широкополосного усилителя с двухполосниками комбинированной ОС. Введение двух типов цепей, ФТЦ и СЦ, усложняет расчет, принципиальную схему и настройку широкополосного усилителя.

В данной работе для приближения параметров активного элемента к требуемым параметрам активного четырехполосника для широкополосного каскада с двухполосниками комбинированной ОС предложена обобщенная структурная схема активного четырехполосника, представленного активным элементом, на входе и выходе которого включены фазированно-согласующие цепи (ФСЦ), которые выполняют одновременно функции фазирования и согласования, что упрощает расчет, реализацию и настройку широкополосного усилителя.

Требуемые S-параметры активного четырехполосника для широкополосного каскада с двухполосниками комбинированной ОС. Математическая модель в виде аналитических выражений для требуемых S-параметров идеально однонаправленного активного четырехполосника для согласованного каскада широкополосного усилителя с двухполосниками комбинированной ОС, представленного на рис. 1, запишется [1]

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

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

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

где $S_{11АЧ}$, $S_{22АЧ}$, $S_{21АЧ}$, $G_{НОМАЧ}$, S_{21OC} , Z_{OC} , Y_{OC} – коэффициенты отражения по входу и выходу, прямой коэффициент передачи, номинальный коэффициент передачи по мощности активного четырехполосника, прямой коэффициент передачи каскада широкополосного усилителя с комбинированной ОС, нормированное сопротивление и проводимость двухполосников комбинированной ОС.

Из выражений (1)–(3) следует, что при условии равенства $Y_{OC} = Z_{OC}$ соотношения для требуемых S-параметров идеально однонаправленного активного четырехполосника для согласованного каскада широкополосного усилителя с двухполосниками комбинированной ОС запишутся

$$S_{11АЧ} = S_{22АЧ} = 0; \quad (4)$$

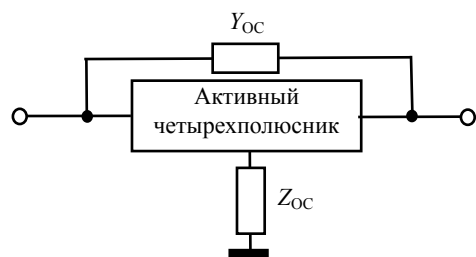


Рис. 1. Активный четырехполосник с двухполосниками комбинированной ОС

$$S_{21АЧ} = \frac{S_{21OC} + Y_{OC}(S_{21OC} - 1)}{1 + Y_{OC}(S_{21OC} - 1)}; \tag{5}$$

$$G_{НОМАЧ} = |S_{21АЧ}|^2. \tag{6}$$

По выражению (5) для заданной структуры двухполосников комбинированной ОС можно определить требуемые S -параметры активного четырехполосника для каскада широкополосного усилителя без ОС, при этом комплексный коэффициент передачи S_{21OC} задается в следующем виде:

$$S_{21OC} = |S_{21OC}| \exp(i\Theta_{21OC}), \tag{7}$$

где Θ_{21OC} – фаза комплексного коэффициента передачи.

Нормированные значения для R -двухполосников комбинированной ОС, проводимость параллельной ОС Y_{OCR} и сопротивление последовательной ОС Z_{OCR} определим из выражения

$$Y_{OCR} = Z_{OCR} = 1 / (1 + |S_{21OC}|); \tag{8}$$

для последовательного RL -двухполосника проводимость параллельной ОС Y_{OCLR} и параллельного RC -двухполосника, сопротивление последовательной ОС Z_{OCLR} находим из выражения

$$Y_{OCLR} = Z_{OCLR} = Y_{OCR} / [1 + i(1 - \Theta_{21OC} / 180^\circ)]; \tag{9}$$

для параллельного RC -двухполосника проводимость параллельной ОС Y_{OCLC} и последовательного RL -двухполосника, сопротивление последовательной ОС Z_{OCLC} находим как

$$Y_{OCLC} = Z_{OCLC} = Y_{OCR} \cdot [1 + i(1 - \Theta_{21OC} / 180^\circ)]. \tag{10}$$

На рис. 2 приведены зависимости: модуля коэффициента передачи $|S_{21OC}|$ от фазы коэффициента передачи Θ_{21OC} для каскада широкополосного усилителя с ОС; модуля коэффициента передачи $|S_{21R}|$ от фазы коэффициента передачи Θ_{21R} для активного четырехполосника с R -двухполосниками комбинированной ОС; модуля коэффициента передачи $|S_{21LC}|$ от фазы коэффициента передачи Θ_{21LC} для активного четырехполосника с RL -двухполосником параллельной ОС Y_{OCLR} и RC -двухполосником последовательной ОС Z_{OCLR} ; модуля коэффициента передачи $|S_{21CL}|$ от фазы коэффициента передачи Θ_{21CL} для активного четырехполосника с RC -двухполосником параллельной ОС Y_{OCLC} и RL -двухполосником последовательной ОС Z_{OCLC} , рассчитанные на основе выражений (5)–(10) для коэффициента передачи широкополосного усилителя $|S_{21OC}| = 12$ дБ и $\Theta_{21OC} = -90^\circ \div +90^\circ$ с шагом $\Delta\Theta_{21OC} = 22,5^\circ$.

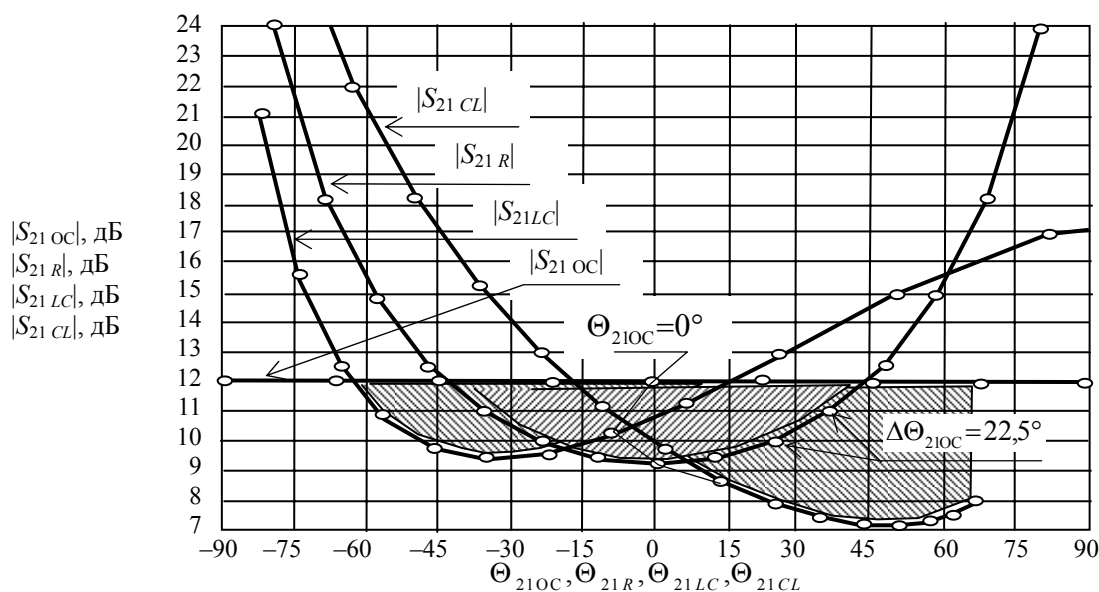


Рис. 2. Зависимости $|S_{21OC}|$, $|S_{21R}|$, $|S_{21LC}|$, $|S_{21CL}|$ активного четырехполосника для широкополосного усилителя с коэффициентом передачи $|S_{21OC}| = 12$ дБ

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 2, показывает, что в областях ниже коэффициента передачи для каскада широкополосного усилителя с ОС $|S_{21OC}| = 12$ дБ получается выигрыш как по коэффициенту усиления, так и по верхней граничной частоте по отношению к номинальному коэффициенту передачи активного элемента.

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

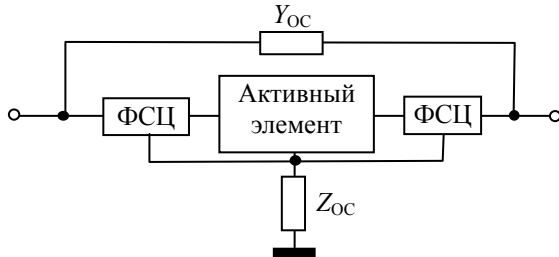


Рис. 3. Обобщенная структурная схема широкополосного усилителя с двухполюсниками комбинированной ОС

Для активного элемента при двухстороннем согласовании выражения для номинального коэффициента усиления по мощности $G_{НОМ}$ и для оптимальных проводимостей генератора $Y_{ГО}$ и нагрузки $Y_{НО}$ запишутся [2]

$$G_{НОМ} = \frac{|y_{21}|}{|y_{12}|} (K_Y - \sqrt{K_Y^2 - 1}); \quad (11)$$

$$Y_{ГО} = G_{ГО} + iB_{ГО} = \frac{|y_{12} y_{21}| \sqrt{K_Y^2 - 1}}{2\text{Re}(y_{22})} + i \left(\frac{\text{Im}(y_{12} y_{21})}{2\text{Re}(y_{22})} - \text{Im}(y_{11}) \right); \quad (12)$$

$$Y_{НО} = G_{НО} + iB_{НО} = \frac{|y_{12} y_{21}| \sqrt{K_Y^2 - 1}}{2\text{Re}(y_{11})} + i \left(\frac{\text{Im}(y_{12} y_{21})}{2\text{Re}(y_{11})} - \text{Im}(y_{22}) \right), \quad (13)$$

где $G_{ГО}$, $B_{ГО}$, $G_{НО}$, $B_{НО}$ – реальная и мнимая части оптимальных проводимостей генератора и нагрузки; y_{11} , y_{12} , y_{21} , y_{22} – y -параметры активного элемента; $| \cdot |$, Re , Im – модуль, реальная и мнимая части комплексного числа; K_Y – инвариантный коэффициент устойчивости, равный

$$K_Y = \frac{2\text{Re}(y_{11})\text{Re}(y_{22}) - \text{Re}(y_{12}y_{21})}{|y_{12}y_{21}|}. \quad (14)$$

Для безусловной устойчивости активного элемента должны выполняться следующие неравенства: $K_Y > 1$, $\text{Re}(y_{11}) > 0$, $\text{Re}(y_{22}) > 0$. Если эти неравенства не выполняются, то на входе или выходе вводят стабилизирующие проводимости.

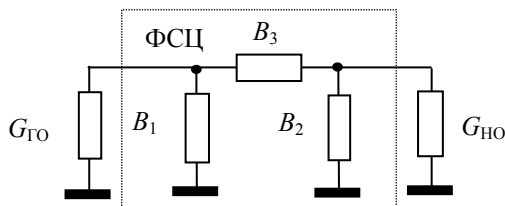


Рис. 4. Схема ФСЦ

Расчет ФСЦ. Расчет ФСЦ, приведенной на рис. 4, проведем на основе нормированной матрицы S -параметров согласованного реактивного обратимого четырехполюсника, которая запишется в следующем виде [3]:

$$[S] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \exp(i\Theta) \\ \exp(i\Theta) & 0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где Θ – значение фазы коэффициента передачи ФСЦ.

Используя нормированную матрицу S -параметров согласованного реактивного обратимого четырехполюсника (15), на основе соотношений перехода от S -параметров к Y -параметров получим сначала матрицу нормированных Y -параметров ФСЦ, а затем матрицу ненормированных Y -параметров ФСЦ в следующем виде

$$Y_{ФСЦ} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{ГО} \frac{1 + \exp(i2\Theta)}{1 - \exp(i2\Theta)} & -2\sqrt{G_{ГО} G_{НО}} \frac{\exp(i\Theta)}{1 - \exp(i2\Theta)} \\ -2\sqrt{G_{ГО} G_{НО}} \frac{\exp(i\Theta)}{1 - \exp(i2\Theta)} & G_{НО} \frac{1 + \exp(i2\Theta)}{1 - \exp(i2\Theta)} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где Y_{11} , Y_{12} , Y_{21} , Y_{22} – Y -параметры ФСЦ.

Задавая значения фазы в выражении (16), можно рассчитать Y -параметры ФСЦ. Так как ФСЦ является реактивным обратимым четырехполюсником, то матрица Y -параметров ФСЦ содержит только мнимые части, и недиагональные элементы матрицы равны $Y_{12} = Y_{21}$. Тогда выражения для нормированных значений элементов принципиальной схемы ФСЦ запишутся

$$B_1 = \text{Im}(Y_{11}) + \text{Im}(Y_{12}), \quad B_2 = \text{Im}(Y_{22}) + \text{Im}(Y_{21}), \quad B_3 = -\text{Im}(Y_{12}). \quad (17)$$

Если проводимости генератора и нагрузки содержат мнимые части $B_{Г0}$ и $B_{Н0}$, то они учитываются при расчете B_1 и B_2 .

Обобщенная структурная схема активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с комбинированной ОС на основе активного элемента с ФСЦ на входе и выходе приведена на рис. 5.

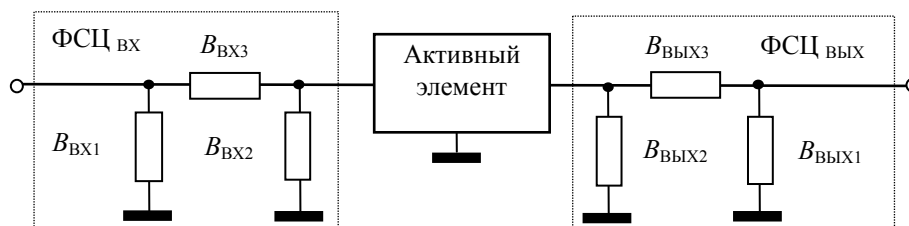


Рис. 5. Схема активного четырехполюсника на основе активного элемента с ФСЦ на входе и выходе

Алгоритм расчета каскада широкополосного усилителя с двухполюсниками комбинированной ОС. Алгоритм расчета ориентирован на максимальное приближение S -параметров активного элемента к требуемым параметрам активного четырехполюсника для широкополосного усилителя с двухполюсниками комбинированной ОС и заключается в следующем:

1) на основе S -параметров активного элемента на заданной верхней частоте рассчитываются Y -параметры активного элемента и по выражениям (11)–(14) – инвариантный коэффициент устойчивости K_U , номинальный коэффициент усиления по мощности $G_{НОМ}$, оптимальные проводимости генератора $Y_{Г0}$ и нагрузки $Y_{Н0}$;

2) для номинального коэффициента усиления по мощности $G_{НОМ}$ на основе выражения (5) рассчитываются и строятся зависимости требуемых S -параметров активного четырехполюсника для широкополосного каскада с двухполюсниками комбинированной ОС (8)–(10), аналогичные зависимостям рис. 2;

3) для приближения S -параметров активного элемента к требуемым параметрам активного четырехполюсника задается значение фазы коэффициента передачи ФСЦ и по выражениям (16) и (17) рассчитываются Y -параметры ФСЦ, а затем S -параметры активного четырехполюсника, приведенного на рис. 5, которые сравниваются с требуемыми параметрами активного четырехполюсника, рассчитанными в пункте 2, и уточняется структура двухполюсников ОС [3];

4) рассчитываются S -параметры широкополосного усилителя с двухполюсниками комбинированной ОС.

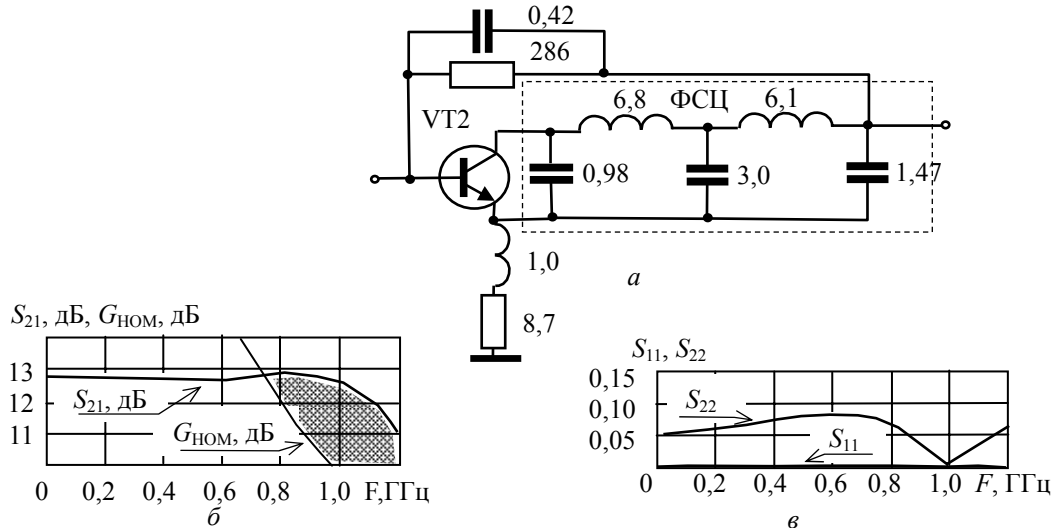
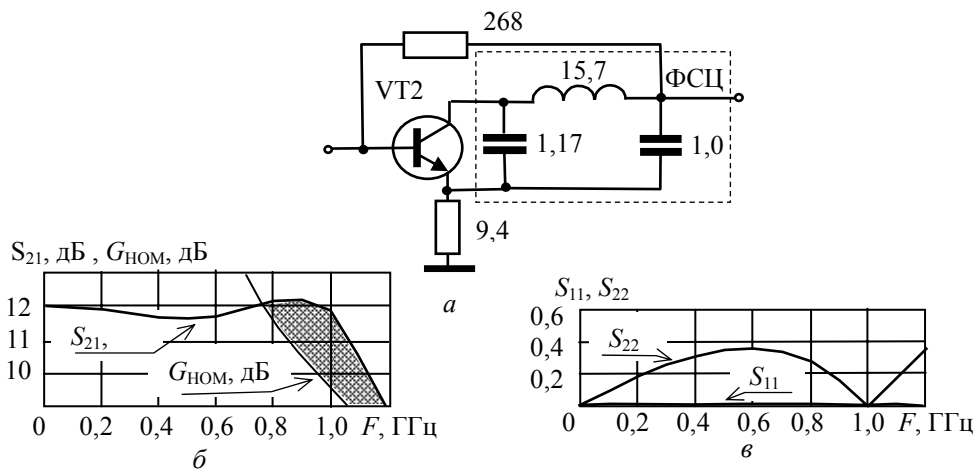
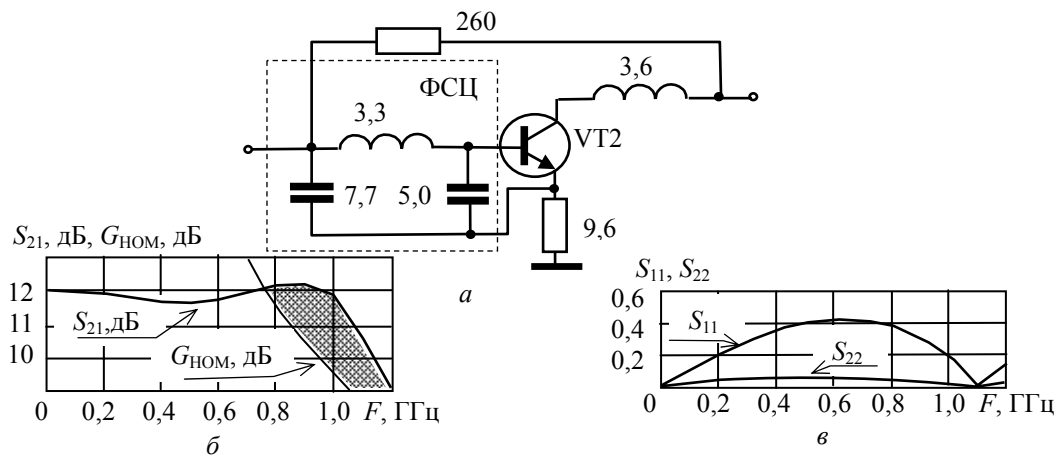
Применим этот алгоритм к расчету каскада широкополосного усилителя.

Математическое моделирование широкополосного усилителя с комбинированной ОС. Математическое моделирование проведем на основе эквивалентной схемы кристалла, которая использовалась при математическом моделировании в работе [1].

На рис. 6–8 приведены принципиальные схемы и результаты расчета S -параметров для различных вариантов эквивалентных схем кристалла транзистора [1].

Результаты расчетов показывают, что чем точнее приближены с помощью ФСЦ S -параметры кристалла транзистора к требуемым параметрам активного четырехполюсника, рассчитанным в соответствии с п. 2, тем равномернее частотная зависимость коэффициента передачи и меньше коэффициенты отражения широкополосного усилителя с комбинированной ОС (рис. 6, б, в). Отклонение от требуемых S -параметров приводит к появлению неравномерности коэффициента передачи и увеличению коэффициента отражения на средних частотах (рис. 7, б, в и 8, б, в).

Экспериментальная проверка аналогичных теоретических исследований и математического моделирования была приведена автором в предыдущих статьях [1, 4–6].

Рис. 6. Принципиальная схема (а), коэффициенты S_{21} (б), S_{11} и S_{22} (в) для кристалла типа VT1Рис. 7. Принципиальная схема (а), коэффициенты S_{21} (б), S_{11} и S_{22} (в) для кристалла типа VT2Рис. 8. Принципиальная схема (а), коэффициенты S_{21} (б), S_{11} и S_{22} (в) для кристалла типа VT3

Полученные результаты. Предложен алгоритм расчета каскада транзисторного широкополосного усилителя с двухполосниками комбинированной ОС, основанный на том, что прежде чем ввести двухполосники комбинированной ОС, необходимо приблизить S -параметры активного элемента с помощью ФСЦ к требуемым S -параметрам активного четырехполосника для каскада широкополосного усилителя с двухполосниками комбинированной ОС.

Приведены результаты математического моделирования широкополосных усилителей с комбинированной ОС для различных вариантов эквивалентных схем кристалла транзистора [1], показывающие выигрыш в верхней граничной частоте и в коэффициенте передачи по отношению к номинальному коэффициенту передачи по мощности за счет положительной ОС (см. рис. 6, б – 8, б, заштрихованные области).

Показано, что применение на входе и выходе активного элемента ФСЦ вместо двух типов цепей ФТЦ и СЦ [1] упрощает расчет, принципиальную схему активного четырехполюсника и, следовательно, реализацию и настройку широкополосного усилителя.

Литература

1. 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.
2. Шварц Н.З. Линейные транзисторные усилители СВЧ. – М.: Советское радио, 1980. – 368 с.
3. Фельдштейн А.Л. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Советское радио, 1971. – 388 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

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.

Calculation algorithm of a wideband amplifier with two-pole serial and parallel feedback

An algorithm of a wideband amplifier calculation on the basis of an active four-pole in case of a wideband amplifier with two-pole serial and parallel feedback (FB) is suggested. Also a generalized structure of the active four-pole presented by an active element with phase-matching circuits at the input and at the output is suggested.

Keywords: algorithm, mathematical model, active four-pole, wideband amplifier, serial and parallel feedback two-port.