

## Параметрический синтез динамических звеньев для вариантов их включения между нелинейной частью и нагрузкой автоматических систем радиоуправления с общей обратной связью

А.А. Головков , В.А. Головков

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
394064, Россия, г. Воронеж,  
ул. Старых Большевиков, 54а

**Аннотация – Введение:** анализ известной литературы показывает, что использование различных типов согласующих четырехполюсников (реактивных, резистивных, комплексных, смешанных) и охватывающей нелинейный элемент цепи обратной связи позволяет увеличить область физической реализуемости заданных форм частотных характеристик. **Цель работы:** увеличение области физической реализуемости заданных форм частотных характеристик за счет оптимизации параметров согласующих смешанных четырехполюсников и использования дополнительной цепи обратной связи, охватывающей нелинейный элемент и смешанный четырехполюсник. Одна часть таких четырехполюсников состоит только из резистивных элементов, а вторая – только из реактивных элементов. **Материалы и методы:** теория четырехполюсников, матричная алгебра, метод декомпозиции, метод синтеза управляющих устройств СВЧ, схемотехнический метод анализа характеристик радиоустройств. **Результаты:** получены математические модели согласующих смешанных четырехполюсников в виде взаимосвязей между элементами их матрицы передачи и зависимостей сопротивлений их двухполюсников от частоты, оптимальных по критерию обеспечения заданных форм частотных характеристик. **Заключение:** сравнительный анализ теоретических результатов (АЧХ- и ФЧХ-усилителей), полученных путем математического моделирования в системе MathCad, и экспериментальных результатов, полученных путем схемотехнического моделирования в системах OrCad и MicroCap, показывает их удовлетворительное совпадение.

**Ключевые слова** – параметрический синтез согласующих смешанных четырехполюсников; заданные формы частотных характеристик усилительных звеньев.

### Введение

В работе [1] предложен алгоритм параметрического синтеза динамических звеньев [2] автоматических систем радиоуправления [3] в виде согласующих смешанных четырехполюсников (ССЧ), оптимальных по критерию обеспечения заданных характеристик различных усилительных звеньев с учетом наличия нелинейной части, состоящей из нелинейного элемента (НЭ) и охватывающей его обратной связи.

Цель работы состоит в расширении функциональных возможностей усилительных звеньев путем включения дополнительной цепи обратной связи (ЦОС), охватывающей и нелинейную часть и ССЧ.

Для достижения этой цели делается попытка определить минимальное количество и значения параметров ССЧ, при которых обеспечиваются заданные формы АЧХ и ФЧХ (зависимости модуля  $m$  и фазы  $\varphi$  передаточной функции  $H$  от частоты) усилительных звеньев с дополнительной общей обратной связью в одном из режимов работы НЭ (аргументы опущены):

$$H = m(\cos \varphi + j \sin \varphi). \quad (1)$$

Для составления исходных уравнений, удовлетворяющих (1), выделим в явном виде нелинейную часть (НЧ), которая может быть выполнена из трехполюсного нелинейного элемента с обратной связью или без нее, цепь прямой передачи (ЦПП) из НЧ и ССЧ, а также общую ЦОС сопротивления источника сигнала  $z_0 = r_0 + jx_0$  и нагрузки  $z_n = r_n + jx_n$  (рис. 1, 2).

### 1. Алгоритм параметрического синтеза

Для отыскания передаточных функций исследуемых радиоустройств используем известные правила применения матриц различных параметров для описания четырехполюсников и их соединений, а также условия нормировки общей матрицы передачи узла «НЧ–ЦОС–ССЧ» [4; 5]. Тогда передаточную функцию для структуры с параллельной по напряжению ЦОС, показанной на рис. 1, а, можно записать в следующем виде:

$$H = \frac{z_n [y_{21}^{oc}(db_y + a_y b) + 1]}{aA_0 + bB_0 + cC_0 + dD_0 + (ad - bc)E_0 + H_0}, \quad (2)$$

где

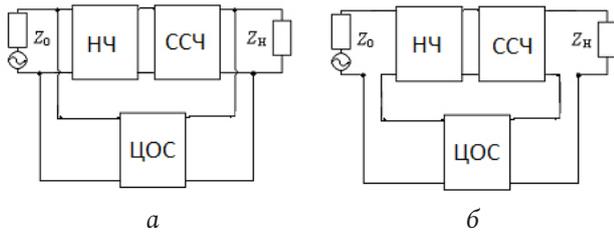


Рис. 1. Структурные схемы усилительных звеньев с параллельной по напряжению (а), последовательной по току (б) общими цепями обратной связи и ССЧ

Fig. 1. Structural diagrams of amplifying links with parallel voltage (a), series current (b) common feedback circuits and SFS

$$\begin{aligned} A_0 &= z_n [c_y z_0 + a_y (1 + y_{11}^{oc} z_0)]; \\ B_0 &= [y_{12}^{oc} y_{21}^{oc} z_0 z_n + (1 + y_{11}^{oc} z_0)(1 - y_{22}^{oc} z_n)] a_y + B_{01}; \\ B_{01} &= c_y z_0 (1 - y_{22}^{oc} z_n); \\ C_0 &= z_n [d_y z_0 + b_y (1 + y_{11}^{oc} z_0)]; \\ D_0 &= [y_{12}^{oc} y_{21}^{oc} z_0 z_n + (1 + y_{11}^{oc} z_0)(1 - y_{22}^{oc} z_n)] b_y + D_{01}; \\ D_{01} &= d_y z_0 (1 - y_{22}^{oc} z_n); \\ E_0 &= -y_{21}^{oc} z_0 z_n (a_y d_y - b_y c_y); \\ H_0 &= y_{12}^{oc} z_0 z_n; \end{aligned}$$

$a_y, b_y, c_y, d_y$  – известные зависимости комплексных элементов классической матрицы передачи НЧ от частоты;  $y_{11}^{oc}, y_{12}^{oc}, y_{21}^{oc}, y_{22}^{oc}$  – известные зависимости элементов матрицы проводимостей ЦОС от частоты;  $a, b, c, d$  – искомые зависимости комплексных элементов классической матрицы передачи ССЧ.

Если положить  $y_{11}^{oc} = 0, y_{12}^{oc} = 0, y_{21}^{oc} = 0, y_{22}^{oc} = 0$ , то предлагаемый алгоритм синтеза оказывается справедливым и для усилительных динамических звеньев без ЦОС [1]. При синтезе ССЧ без ЦОС и НЧ надо дополнительно принять  $a_y = 1, b_y = 0, c_y = 0, d_y = 1$ . Если (1) означает обеспечение квазилинейного склона зависимости модуля передаточной функции от частоты, излагаемый материал применим и для синтеза высокочастотной части демодуляторов сигналов с угловой модуляцией.

Подставим (2) в (1). Получим комплексное уравнение, решение которого приводит к взаимосвязи элементов классической матрицы передачи ССЧ, оптимальной по критерию (1):

$$d = \frac{(C_1 c + B)b + D_1 a + C_2 c + C}{C_1 a + D}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} B &= a_y y_{21}^{oc} z_n - B_0 M = b_r + j b_x; \\ C &= z_n - H_0 M = c_r + j c_x; \\ C_1 &= E_0 M = c_{1r} + j c_{1x}; \\ C_2 &= -C_0 M = c_{2r} + j c_{2x}; \end{aligned}$$

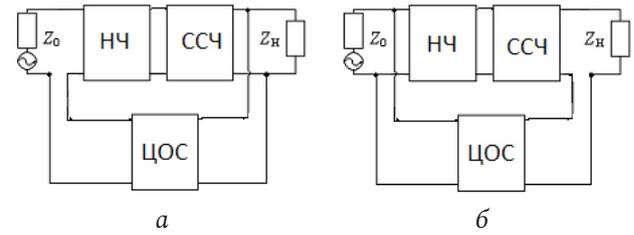


Рис. 2. Структурные схемы усилительных звеньев с последовательной по напряжению (а), параллельной по току (б) общими цепями обратной связи и ССЧ

Fig. 2. Structural diagrams of amplifying links with serial voltage (a), parallel current (b) common feedback circuits and SFS

$$\begin{aligned} D &= D_0 M - b_y y_{21}^{oc} z_n = d_r + j d_x; \\ D_1 &= -A_0 M = d_{1r} + j d_{1x}. \end{aligned}$$

При использовании последовательной по току ЦОС (рис. 1, б) передаточную функцию можно представить следующим образом:

$$H = \frac{z_n [z_{21}^{oc} (a c_y + c d_y) + 1]}{a A_0 + b B_0 + c C_0 + d D_0 + (ad - bc) E_0 + H_0}, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} A_0 &= [(z_0 + z_{11}^{oc})(z_n - z_{22}^{oc}) + z_{12}^{oc} z_{21}^{oc}] c_y + a_y (z_n - z_{22}^{oc}); \\ B_0 &= a_y + c_y (z_0 + z_{11}^{oc}); \quad H_0 = z_{12}^{oc}; \\ C_0 &= [(z_0 + z_{11}^{oc})(z_n - z_{22}^{oc}) + z_{12}^{oc} z_{21}^{oc}] d_y + b_y (z_n - z_{22}^{oc}); \\ D_0 &= b_y + d_y (z_0 + z_{11}^{oc}); \quad E_0 = -z_{21}^{oc} (a_y d_y - b_y c_y); \\ z_{11}^{oc}, z_{12}^{oc}, z_{21}^{oc}, z_{22}^{oc} & \text{ – известные зависимости элементов матрицы сопротивлений ЦОС от частоты.} \end{aligned}$$

Взаимосвязь между элементами классической матрицы передачи ССЧ, оптимальную по критерию (1), можно также представить в форме (3), но при следующих уточнениях:

$$\begin{aligned} B &= -B_0 M = b_r + j b_x; \\ C &= z_n - H_0 M = c_r + j c_x; \quad C_1 = E_0 M = c_{1r} + j c_{1x}; \\ C_2 &= d_y z_n z_{21}^{oc} - C_0 M = c_{2r} + j c_{2x}; \\ D &= D_0 M = d_r + j d_x; \\ D_1 &= c_y z_n z_{21}^{oc} - A_0 M = d_{1r} + j d_{1x}. \end{aligned} \quad (5)$$

При использовании последовательной по напряжению ЦОС (рис. 2, а):

$$H = \frac{z_n [h_{21}^{oc} (b c_y + d d_y) + 1]}{a A_0 + b B_0 + c C_0 + d D_0 + (ad - bc) E_0 + H_0}, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} A_0 &= z_n [a_y + c_y (z_0 + h_{11}^{oc})]; \\ H_0 &= h_{12}^{oc} z_n; \\ B_0 &= B_{01} + c_y [(1 - h_{22}^{oc} z_n)(z_0 + h_{11}^{oc}) + h_{12}^{oc} h_{21}^{oc} z_n]; \\ B_{01} &= (1 - h_{22}^{oc} z_n) a_y; \end{aligned}$$

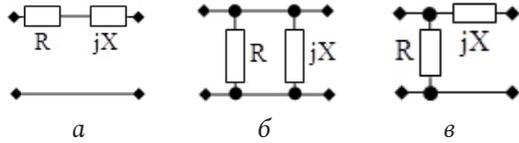


Рис. 3. Примеры синтезированных ССЧ с двумя двухполюсниками  
Fig. 3. Examples of synthesized SFSSs with two two-terminal networks

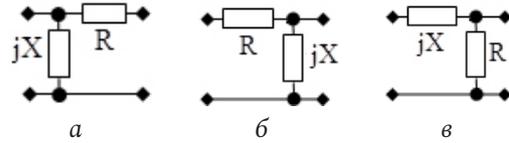


Рис. 4. Примеры синтезированных ССЧ с двумя двухполюсниками (продолжение)  
Fig. 4. Examples of synthesized SFSSs with two two-terminal networks (continued)

$C_0 = z_n [b_y + d_y (z_0 + h_{11}^{oc})]$ ;  
 $D_0 = D_{01} + d_y [(1 - h_{22}^{oc} z_n)(z_0 + h_{11}^{oc}) + h_{12}^{oc} h_{21}^{oc} z_n]$ ;  
 $D_{01} = (1 - h_{22}^{oc} z_n) b_y$ ;  $E_0 = h_{21}^{oc} z_n (a_y d_y - b_y c_y)$ ;  
 $h_{11}^{oc}$ ,  $h_{12}^{oc}$ ,  $h_{21}^{oc}$ ,  $h_{22}^{oc}$  – известные зависимости элементов смешанной матрицы  $H$  ЦОС от частоты.

Коэффициенты для взаимосвязи (3) между элементами классической матрицы передачи ССЧ, оптимальной по критерию (1):

$$\begin{aligned} B &= c_y h_{21}^{oc} z_n - B_0 M = b_r + j b_x; \\ C &= z_n - H_0 M = c_r + j c_x; \\ C_1 &= E_0 M = c_{1r} + j c_{1x}; \\ C_2 &= -C_0 M = c_{2r} + j c_{2x}; \\ D &= D_0 M - d_y z_n h_{21}^{oc} = d_r + j d_x; \\ D_1 &= -A_0 M = d_{1r} + j d_{1x}. \end{aligned} \quad (7)$$

При использовании параллельной по току обратной связи (рис. 1, з):

$$H = \frac{z_n [f_{21}^{oc} (a a_y + b_y c) + 1]}{a A_0 + b B_0 + c C_0 + d D_0 + (ad - bc) E_0 + H_0}, \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} A_0 &= [f_{12}^{oc} f_{21}^{oc} z_0 + (1 + f_{11}^{oc} z_0)(z_n - f_{22}^{oc})] a_y + A_{01}; \\ A_{01} &= c_y z_0 (z_n - f_{22}^{oc}); \quad B_0 = a_y (1 + f_{11}^{oc} z_0) + z_0 c_y; \\ C_0 &= [f_{12}^{oc} f_{21}^{oc} z_0 + (z_n - f_{22}^{oc})(1 + f_{11}^{oc} z_0)] b_y + C_{01}; \\ C_{01} &= d_y z_0 (z_n - f_{22}^{oc}); \quad D_0 = d_y z_0 + b_y (1 + f_{11}^{oc} z_0); \\ E_0 &= f_{21}^{oc} z_0 (a_y d_y - b_y c_y); \quad H_0 = f_{12}^{oc} z_0; \end{aligned}$$

$f_{11}^{oc}$ ,  $f_{12}^{oc}$ ,  $f_{21}^{oc}$ ,  $f_{22}^{oc}$  – известные зависимости элементов смешанной матрицы  $F$  ЦОС от частоты.

Коэффициенты для взаимосвязи (3) для этого варианта:

$$\begin{aligned} B &= -B_0 M = b_r + j b_x; \\ C &= z_n - H_0 M = c_r + j c_x; \quad C_1 = E_0 M = c_{1r} + j c_{1x}; \\ C_2 &= b_y z_n f_{21}^{oc} - C_0 M = c_{2r} + j c_{2x}; \\ D &= D_0 M = d_r + j d_x; \\ D_1 &= a_y z_n f_{21}^{oc} - A_0 M = d_{1r} + j d_{1x}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для отыскания выражений для определения параметров типовых схем ССЧ необходимо найти эле-

менты  $a, b, c, d$  [4; 5], выраженные через сопротивления или проводимости двухполюсников, а также коэффициенты  $B, C, C_1, C_2, D, D_1$  с выбранным типом обратной связи и подставить их в (3). Затем это комплексное уравнение надо разделить на действительную и мнимую части и решить полученную таким образом систему двух алгебраических действительных уравнений относительно сопротивлений или проводимостей двух двухполюсников выбранной схемы ССЧ. В результате получаются зависимости сопротивлений резистивных и реактивных двухполюсников от частоты, оптимальные по критерию (1). Задача реализации этих частотных характеристик в ограниченной полосе частот решена в работе [4].

## 2. Результаты параметрического синтеза

Здесь приводятся некоторые из решений, полученных для типовых схем ССЧ при использовании варианта структурной схемы с параллельной по напряжению обратной связью (рис. 1, а). Если в качестве ССЧ используется последовательно включенные резистивный двухполюсник с сопротивлением  $R$  и реактивный двухполюсник с сопротивлением  $jX$  (рис. 3, а), то зависимости этих сопротивлений от частоты определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} R &= \frac{(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) b_r + (c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) b_x}{-(b_r^2 + b_x^2)}; \\ X &= \frac{(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) b_r - (c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) b_x}{-(b_r^2 + b_x^2)}. \end{aligned} \quad (10)$$

ССЧ в виде параллельно включенных двухполюсников  $R$  и  $jX$  (рис. 3, б):

$$\begin{aligned} R &= \frac{-(c_{2r}^2 + c_{2x}^2)}{(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) c_{2r} + (c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) c_{2x}}; \\ X &= \frac{-(c_{2r}^2 + c_{2x}^2)}{(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) c_{2x} - (c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) c_{2r}}. \end{aligned} \quad (11)$$

ССЧ в виде Г-образного соединения двухполюсников  $R$  и  $jX$  (рис. 3, в):



$$B_2 = [b_x(c_r - c_{1r}) + b_r(c_{1x} - c_x)]X_2 + \\ + X_2^2(b_r^2 + b_x^2) + b_r c_{2r} + b_x c_{2x} - d_r d_{1r} - d_x d_{1x}; \\ C_2 = X_2(d_{1r} - X_2 b_x)(c_{1x} - c_x + d_x) - \\ - X_2(d_{1x} + X_2 b_r)(c_{1r} - c_r + d_r) + X_2(b_r c_{2x} - b_x c_{2r}) + \\ + X_2^2(b_r d_{1r} + b_x d_{1x}) + c_{2r} d_{1r} + c_{2x} d_{1x}.$$

При выборе комбинации  $jX_2, R_3$  (рис. 5, а) надо в (16) положить  $X_1 = X_2; X_2 = R_3$ :

$$A_1 = b_x(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) - \\ - b_r(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) - X_1(b_r^2 + b_x^2); \\ B_1 = (d_x - X_1 b_r)(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) + \\ + (d_r + X_1 b_x)(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) + \\ + b_r c_{2r} + b_x c_{2x} - X_1^2(b_r^2 + b_x^2) - \\ - X_1[(d_{1x} - d_x)b_r - (d_{1r} - d_r)b_x]; \\ C_1 = C_0 + X_1(b_r c_{2r} + b_x c_{2x} + \\ + d_r d_{1r} + d_x d_{1x}) - c_{2r} d_x + c_{2x} d_r; \\ C_0 = X_1^2(b_x d_{1r} - b_r d_{1x}); \quad A_2 = -(b_r d_r + b_x d_x); \\ B_2 = d_r(c_{1r} - c_r - d_{1r} + d_r) + d_x(c_{1x} - c_x - d_{1x} + d_x) + \\ + b_r c_{2r} + b_x c_{2x} + X_1^2(b_r^2 + b_x^2) + \\ + [b_r(c_x - c_{1x} - 2d_x) + b_x(c_{1r} - c_r + 2d_r)]X_1; \\ C_2 = X_1[d_{1r}(c_x - c_{1x} + d_{1x}) + d_{1x}(c_{1r} - c_r + d_r) + \\ + b_r c_{2x} - b_x c_{2r}] + X_1^2(b_r d_{1r} + b_x d_{1x}) + \\ + c_{2r}(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) + c_{2x}(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}).$$

ССЧ в виде Т-образного соединения двухполюсников  $jX_1, jX_3$  и  $R_2$  (рис. 5, б). При выборе комбинации  $jX_1, R_2$  в (16)  $X_1 = X_1; X_2 = R_2$ :

$$A_1 = X_3(b_r^2 + b_x^2) + b_r d_{1x} - b_x d_{1r}; \quad (17) \\ B_1 = (c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x})d_{1x} + \\ + X_3[(c_x - c_{1x} - 2d_x + 2d_{1x})b_r - \\ - b_x(c_r - c_{1r} - 2d_r + 2d_{1r})] + (c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})d_{1r} - \\ - b_r c_{2r} - b_x c_{2x} + X_3(b_r^2 + b_x^2); \\ C_1 = (c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})(c_{2x} - X_3 d_r) - \\ - X_3(b_r c_{2r} + b_x c_{2x}) - X_3^2(b_r d_x - b_x d_r) - \\ - (c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x})(c_{2r} + X_3 d_x); \\ A_2 = (c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x})b_x + (c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})b_r; \\ B_2 = X_3^2(b_r^2 + b_x^2) + [(c_x - c_{1x} + 2d_{1x})b_r - \\ - b_x(c_r - c_{1r} + 2d_{1r})]X_3 + (c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})d_{1r} - \\ - d_{1x}(c_{1x} - c_x + d_x - d_{1x}) + b_r c_{2r} + b_x c_{2x}; \\ C_2 = X_3(b_r c_{2x} - b_x c_{2r} - d_r d_{1x} + d_x d_{1r}) -$$

$$- X_3^2(b_r d_r + b_x d_x) + c_{2r} d_{1r} + c_{2x} d_{1x}.$$

При выборе комбинации  $jX_1, jX_3$  (рис. 5, б) надо в (16) положить  $X_1 = X_1; X_2 = X_3$ :

$$A_1 = R_2(b_r^2 + b_x^2) + b_r d_{1r} + b_x d_{1x}; \\ B_1 = b_r c_{2x} - b_x c_{2r} + d_r d_{1x} - d_x d_{1r} + \\ + R_2[(c_x - c_{1x} - 2d_x)b_r + b_x(c_{1r} - c_r + 2d_r)]; \\ C_1 = R_2(b_r c_{2r} + b_x c_{2x}) - \\ - R_2(d_r - R_2 b_r)(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) - \\ - R_2(d_x - R_2 b_x)(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) - \\ - (c_{2r} d_r + c_{2x} d_x); \\ A_2 = R_2(b_r^2 + b_x^2) - b_r d_r - b_x d_x; \\ B_2 = b_r c_{2x} - b_x c_{2r} + R_2[b_r(c_x - c_{1x} + 2d_{1x}) - \\ - b_x(c_r - c_{1r} + 2d_{1r})] + d_x d_{1r} - d_r d_{1x}; \\ C_2 = R_2[(d_{1x} + R_2 b_x)(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) + \\ + b_r c_{2r} + b_x c_{2x}] + c_{2r} d_{1r} + c_{2x} d_{1x} + \\ + R_2(d_{1r} + R_2 b_r)(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}).$$

При выборе комбинации  $R_2, jX_3$  (рис. 5, б) надо в (16) положить  $X_1 = R_2; X_2 = X_3$ :

$$A_1 = b_x(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) + b_r(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}); \\ B_1 = d_x(c_{1x} - c_x - d_{1x} + d_x) + d_r(c_{1r} - c_r - d_{1r} + d_r) + \\ + X_1^2(b_r^2 + b_x^2) + b_r c_{2r} + b_x c_{2x} - d_r d_{1r} - d_x d_{1x} + \\ + X_1[(c_{1r} - c_r + 2d_r)b_x - b_r(c_{1x} - c_x + 2d_x)]; \\ C_1 = X_1(b_r c_{2x} - b_x c_{2r} + d_r d_{1x} - d_x d_{1r}) - \\ - c_{2r} d_r - c_{2x} d_x + X_1^2(b_r d_{1r} + b_x d_{1x}); \\ A_2 = X_1^2(b_r^2 + b_x^2) - b_r d_x + b_x d_r; \\ B_2 = (d_x - 2X_1 b_r)(d_x - d_{1x}) + \\ + (d_r + 2X_1 b_x)(d_r - d_{1r}) - (c_x - c_{1x})(d_x - X_1 b_r) - \\ - b_r c_{2r} - b_x c_{2x} - (d_r + X_1 b_x)(c_r - c_{1r}) + X_1^2(b_r^2 + b_x^2); \\ C_2 = (X_1 d_{1x} - c_{2r})(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) + \\ + X_1^2(b_r d_{1x} - b_x d_{1r}) - X_1(b_r c_{2r} + b_x c_{2x}) + \\ + (c_{2x} + X_1 d_{1r})(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}).$$

ССЧ в виде Т-образного соединения двухполюсников  $R_1, jX_2, jX_3$  (рис. 5, в). При этом в (16)  $X_1 = R_1; X_2 = X_2$ :

$$A_1 = b_r d_{1r} + b_x d_{1x}; \quad (18) \\ B_1 = (c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})d_{1r} - d_{1x}(c_{1x} - c_x + d_x - d_{1x}) + \\ + b_r c_{2r} + b_x c_{2x} + X_3^2(b_r^2 + b_x^2) + \\ + X_3[(c_{1r} - c_r - 2d_{1r})b_x + b_r(c_x - c_{1x} + 2d_{1x})];$$

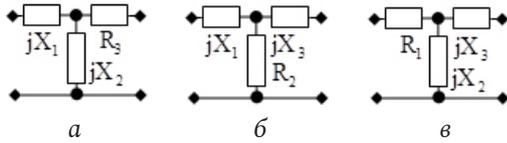


Рис. 5. Примеры синтезированных ССЧ с тремя двухполюсниками  
 Fig. 5. Examples of synthesized SFSSs with three two-terminal networks

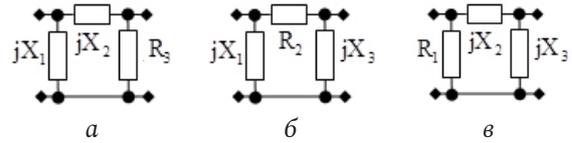


Рис. 6. Примеры синтезированных ССЧ с тремя двухполюсниками (продолжение)  
 Fig. 6. Examples of synthesized SFSSs with three two-terminal networks (continued)

$$\begin{aligned}
 C_1 &= (c_{2x} - X_3 d_r)(c_x - c_{1x} + d_{1x}) + \\
 &+ X_3(b_r c_{2x} - b_x c_{2r}) - X_3^2(b_r d_r + b_x d_x) - \\
 &- c_{2r} d_r - c_{2x} d_x + (c_{2r} + X_3 d_x)(c_r - c_{1r} + d_{1r}); \\
 A_2 &= b_x(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) - \\
 &- b_r(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) - X_3(b_r^2 + b_x^2); \\
 B_2 &= (d_r - 2X_3 b_x)(d_r - d_{1r}) + b_r c_{2r} + b_x c_{2x} - \\
 &- (d_{1x} + X_3 b_r)(c_x - c_{1x}) - (c_r - c_{1r})(d_{1r} - X_3 b_x) - \\
 &- X_3^2(b_r^2 + b_x^2) + (d_{1x} + 2X_3 b_r)(d_x - d_{1x}); \\
 C_2 &= X_3(b_r c_{2r} + b_x c_{2x} + d_r d_{1r} + d_x d_{1x}) + \\
 &+ c_{2r} d_{1x} - c_{2x} d_{1r} + (b_r d_x - b_x d_r) X_3^2.
 \end{aligned}$$

При выборе комбинации  $R_1, jX_3$  (рис. 5, в) надо в (16) положить  $X_1 = R_1; X_2 = X_3$ :

$$\begin{aligned}
 A_1 &= b_r d_{1r} + b_x d_{1x}; \\
 B_1 &= (b_r^2 + b_x^2) X_2^2 + b_r c_{2r} + b_x c_{2x} + \\
 &+ X_2[(c_r - c_{1r}) b_x - b_r(c_x - c_{1x})] - d_r d_{1r} - d_x d_{1x}; \\
 C_1 &= [(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) b_r + \\
 &+ b_x(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x})] X_2^2 + [b_r c_{2x} - b_x c_{2r} + \\
 &+ (c_x - c_{1x} + d_{1x}) d_r - d_x(c_r - c_{1r} + d_{1r})] X_2 - \\
 &- c_{2r} d_r - c_{2x} d_x; \\
 A_2 &= b_r d_x - b_x d_r - X_2(b_r^2 + b_x^2); \\
 B_2 &= X_2[(c_{1x} - c_x + 2d_x - 2d_{1x}) b_r - (b_r^2 + b_x^2) X_2^2 + \\
 &+ b_x(c_r - c_{1r} - 2d_r + 2d_{1r})] + \\
 &+ b_r c_{2r} + b_x c_{2x} + d_r d_{1r} + d_x d_{1x}; \\
 C_2 &= (b_r c_{2r} + b_x c_{2x}) X_2 - \\
 &- X_2(d_{1r} - X_2 b_x)(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) - \\
 &- X_2(d_{1x} + X_2 b_r)(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) + c_{2r} d_{1x} - c_{2x} d_{1r}.
 \end{aligned}$$

При выборе комбинации  $jX_2, jX_3$  (рис. 5, в) надо в (16) положить  $X_1 = X_2; X_2 = X_3$ :

$$\begin{aligned}
 A_1 &= (b_r^2 + b_x^2) R_1 + (c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) b_r + \\
 &+ b_x(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}); \\
 B_1 &= (R_1 b_x - d_x)(c_r - c_{1r}) + (d_r - R_1 b_r)(c_x - c_{1x}) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ b_r c_{2x} - b_x c_{2r} + d_r d_{1x} - d_x d_{1r}; \\
 C_1 &= R_1^2(b_r d_{1r} + b_x d_{1x}) + \\
 &+ R_1(b_r c_{2r} + b_x c_{2x} - d_r d_{1r} - d_x d_{1x}) - c_{2r} d_r - c_{2x} d_x; \\
 A_2 &= R_1(b_r^2 + b_x^2) - b_r d_r - b_x d_x; \\
 B_2 &= (c_{1x} - c_x - d_x) d_r + b_r c_{2x} - b_x c_{2r} + \\
 &+ R_1[(c_x - c_{1x} + 2d_{1x}) b_r - b_x(c_r - c_{1r} + 2d_{1r})] + \\
 &+ d_x(c_r - c_{1r} + d_{1r}); \\
 C_2 &= (c_{2x} + R_1 d_{1x})(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) + \\
 &+ (c_{2r} + R_1 d_{1r})(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) + \\
 &+ R_1(b_r c_{2r} + b_x c_{2x}) + R_1^2(b_r d_{1r} + b_x d_{1x}).
 \end{aligned}$$

ССЧ в виде П-образного соединения двухполюсников  $jX_1, jX_2$  и  $R_3$  (рис. 6, а). При этом в (16)  $X_1 = X_1; X_2 = X_2$ :

$$\begin{aligned}
 A_1 &= [(d_{1x} + R_3 b_x)(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) + \\
 &+ b_r c_{2r} + b_x c_{2x}] R_3 + [(d_{1r} + R_3 b_r) \times \\
 &\times (c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})] R_3 + c_{2r} d_{1r} + c_{2x} d_{1x}; \\
 B_1 &= [(c_{1r} - c_r - d_{1r}) d_x + d_r(c_x - c_{1x} + d_{1x}) + \\
 &+ b_r c_{2x} - b_x c_{2r}] R_3^2 + [(c_r - c_{1r} + 2d_{1r}) c_{2x} - \\
 &- c_{2r}(c_x - c_{1x} + 2d_{1x})] R_3; \\
 C_1 &= R_3(c_{2r}^2 + c_{2x}^2) - R_3^2(c_{2r} d_r + c_{2x} d_x); \\
 A_2 &= (b_r c_{2r} + b_x c_{2x} - d_r d_{1r} - d_x d_{1x}) R_3 - \\
 &- (b_r d_r + b_x d_x) R_3^2 + c_{2r} d_{1r} + c_{2x} d_{1x}; \\
 B_2 &= [(c_x - c_{1x}) c_{2r} + (c_{1r} - c_r) c_{2x}] R_3 + \\
 &+ R_3^2[b_r c_{2x} - b_x c_{2r} + d_r(c_{1x} - c_x - d_{1x}) + \\
 &+ d_x(c_r - c_{1r} + d_{1r})]; \\
 C_2 &= [(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) c_{2x} + \\
 &+ c_{2r}(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})] R_3^2 + R_3(c_{2r}^2 + c_{2x}^2).
 \end{aligned} \tag{19}$$

При выборе комбинации  $jX_1, R_3$  (рис. 6, а) надо в (16) положить  $X_1 = X_1; X_2 = R_3$ :

$$\begin{aligned}
 A_1 &= (c_{2x} + X_2 d_{1r})(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) + \\
 &+ X_2^2(b_r d_{1x} - b_x d_{1r}) - X_2(b_r c_{2r} + b_x c_{2x}) -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -(c_{2r} - X_2 d_{1x})(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}); \\
B_1 &= X_2[(c_{1x} - c_x + 2d_x - 2d_{1x})c_{2r} + \\
& + c_{2x}(c_r - c_{1r} - 2d_r + 2d_{1r})] - \\
& - X_2^2(b_r c_{2r} + b_x c_{2x} + d_r d_{1r} + d_x d_{1x}) + c_{2r}^2 + c_{2x}^2; \\
C_1 &= X_2(c_{2r}^2 + c_{2x}^2) + X_2^2(c_{2r} d_x - c_{2x} d_r); \\
A_2 &= [(c_{1x} - c_x - d_{1x})d_r + d_x(c_r - c_{1r} + d_{1r}) + \\
& + b_r c_{2x} - b_x c_{2r}]X_2 - (b_r d_r + b_x d_x)X_2^2 + \\
& + (c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})c_{2r} + c_{2x}(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}); \\
B_2 &= (b_r c_{2r} + b_x c_{2x} - d_r d_{1r} - d_x d_{1x})X_2^2 + c_{2r}^2 + c_{2x}^2 - \\
& - [(c_r - c_{1r})c_{2x} - c_{2r}(c_x - c_{1x})]X_2; \\
C_2 &= (c_{2r} d_{1r} + c_{2x} d_{1x})X_2^2.
\end{aligned}$$

При выборе комбинации  $jX_2, R_3$  (рис. 6, а) надо в (16) положить  $X_1 = X_2; X_2 = R_3$ :

$$\begin{aligned}
A_1 &= X_1^2(b_r d_{1x} - b_x d_{1r}) - X_1(b_r c_{2r} + \\
& + b_x c_{2x} + d_r d_{1r} + d_x d_{1x}) + c_{2r} d_x - c_{2x} d_r; \\
B_1 &= [(c_{2x} + d_{1r} X_1)(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) - \\
& - (c_{2r} - d_{1x} X_1)(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x})]X_1 - \\
& - X_1^2(b_r c_{2r} + b_x c_{2x}) - X_1[c_{2x}(d_r - d_{1r}) - \\
& - c_{2r}(d_x - d_{1x})] + c_{2r}^2 + c_{2x}^2; \\
C_1 &= [(c_{1x} - c_x + d_x - d_{1x})c_{2r} + \\
& + c_{2x}(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})]X_1^2 + X_1(c_{2r}^2 + c_{2x}^2); \\
A_2 &= [(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x})b_x + \\
& + b_r(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})]X_1^2 - c_{2r} d_r - c_{2x} d_x + \\
& + [(c_{1r} - c_r - d_{1r})d_x + d_r(c_x - c_{1x} + d_{1x}) + \\
& + b_r c_{2x} - b_x c_{2r}]X_1; \\
B_2 &= [(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x})d_{1x} - \\
& - d_{1r}(c_{1r} - c_r + d_r - d_{1r}) + b_r c_{2r} + b_x c_{2x}]X_1^2 + \\
& + c_{2r}^2 + c_{2x}^2 + [(c_{1x} - c_x - 2d_{1x})c_{2r} + \\
& + c_{2x}(c_r - c_{1r} + 2d_{1r})]X_1; \\
C_2 &= (c_{2r} d_{1r} + c_{2x} d_{1x})X_1^2.
\end{aligned}$$

ССЧ в виде П-образного соединения двухполюсников  $jX_1, R_2$  и  $jX_3$  (рис. 6, б). При выборе комбинации  $jX_1, R_2$  в (16) надо положить  $X_1 = X_1; X_2 = R_2$ :

$$\begin{aligned}
A_1 &= X_3[(d_{1r} - X_3 b_x)(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) + \\
& + (d_{1x} + X_3 b_r)(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x})] - \\
& - X_3(b_r c_{2r} + b_x c_{2x}) - c_{2r} d_{1x} + c_{2x} d_{1r};
\end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
B_1 &= c_{2r}^2 + c_{2x}^2 + [c_{2r}(d_x - d_{1x}) - c_{2x}(d_r - d_{1r})]X_3 + \\
& + [(c_{2x} - d_r X_3)(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) - \\
& - (c_{2r} + d_x X_3)(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x})] - \\
& - X_3^2(b_r c_{2r} + b_x c_{2x}); \\
C_1 &= X_3(c_{2r}^2 + c_{2x}^2) + X_3^2(c_{2r} d_x - c_{2x} d_r); \\
A_2 &= -X_3^2(b_r d_r + b_x d_x) + X_3(b_r c_{2x} - b_x c_{2r} - \\
& - d_r d_{1x} + d_x d_{1r}) + c_{2r} d_{1r} + c_{2x} d_{1x}; \\
B_2 &= X_3^2(b_r c_{2r} + b_x c_{2x}) + \\
& + [(c_{1x} - c_x + 2d_x)c_{2r} - c_{2x}(c_{1r} - c_r + 2d_r)]X_3 + \\
& + c_{2r}^2 + c_{2x}^2 + X_3^2[(c_{1x} - c_x - d_{1x} + d_x)d_x + \\
& + d_r(c_{1r} - c_r - d_{1r} + d_r)]; \\
C_2 &= X_3^2[(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})c_{2r} + \\
& + c_{2x}(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x})].
\end{aligned}$$

При выборе комбинации  $jX_1, jX_3$  в (16) надо положить  $X_1 = X_1; X_2 = X_3$  (рис. 6, б):

$$\begin{aligned}
A_1 &= (c_{2x} + R_2 d_{1x})(c_{1x} - c_x + d_x - d_{1x}) - \\
& - R_2(b_r c_{2r} + b_x c_{2x}) - R_2^2(b_r d_{1r} + b_x d_{1x}) - \\
& - (c_{2r} + R_2 d_{1r})(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}); \\
B_1 &= (b_x c_{2r} - b_r c_{2x} - d_r d_{1x} + d_x d_{1r})R_2^2 + \\
& + R_2[(c_x - c_{1x} + 2d_{1x})c_{2r} - c_{2x}(c_r - c_{1r} + 2d_{1r})]; \\
C_1 &= R_2^2(c_{2r} d_r + c_{2x} d_x) - R_2(c_{2r}^2 + c_{2x}^2); \\
A_2 &= (c_{2x} - R_2 d_x)(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) + \\
& + R_2(b_r c_{2r} + b_x c_{2x}) - R_2^2(b_r d_r + b_x d_x) + \\
& + (c_{2r} - R_2 d_r)(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}); \\
B_2 &= (b_r c_{2x} - b_x c_{2r} - d_r d_{1x} + d_x d_{1r})R_2^2 + \\
& + [(c_r - c_{1r} - 2d_r)c_{2x} + c_{2r}(c_{1x} - c_x + 2d_x)]R_2; \\
C_2 &= R_2^2(c_{2r} d_{1r} + c_{2x} d_{1x}) + R_2(c_{2r}^2 + c_{2x}^2).
\end{aligned}$$

При выборе комбинации  $R_2, jX_3$  в (16) надо положить  $X_1 = R_2; X_2 = X_3$  (рис. 6, б):

$$\begin{aligned}
A_1 &= (b_x c_{2r} - b_r c_{2x} - d_r d_{1x} + d_x d_{1r})X_1 + \\
& + c_{2r} d_r + c_{2x} d_x - X_1^2(b_r d_{1r} + b_x d_{1x}); \\
B_1 &= -[b_r c_{2r} + b_x c_{2x} - d_r d_{1r} - d_x d_{1x}]X_1^2 + \\
& + [(c_{2r} - X_1 d_{1x})(c_x - c_{1x} + d_{1x}) - \\
& - (c_{2x} + X_1 d_{1r})(c_r - c_{1r} + d_{1r})] - c_{2r}^2 - c_{2x}^2 + \\
& + X_1(c_{2r} d_{1x} - c_{2x} d_{1r}); \\
C_1 &= -X_1^2[(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})c_{2r} +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ c_{2x}(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}); \\
 A_2 &= c_{2r}d_x - c_{2x}d_r - [b_r c_{2r} + b_x c_{2x} + \\
 &+ (d_r + X_1 b_x)(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})]X_1 + \\
 &+ (d_x - X_1 b_r)(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x})X_1; \\
 B_2 &= [(c_{2x} + d_{1r}X_1)(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) - \\
 &- X_1(b_r c_{2r} + b_x c_{2x})]X_1 + [c_{2r}(d_x - d_{1x}) - \\
 &- (c_{2r} - d_{1x}X_1)(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) - \\
 &- c_{2x}(d_r - d_{1r})]X_1 + c_{2r}^2 + c_{2x}^2; \\
 C_2 &= X_1(c_{2r}^2 + c_{2x}^2) - X_1^2(c_{2r}d_{1x} - c_{2x}d_{1r}).
 \end{aligned}$$

ССЧ в виде П-образного соединения двухполюсников  $R_1$ ,  $jX_2$  и  $jX_3$  (рис. 6, в). При выборе комбинации  $R_1$ ,  $jX_2$  в (16) надо положить  $X_1 = R_1$ ;  $X_2 = X_2$ :

$$\begin{aligned}
 A_1 &= [(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})b_r + \\
 &+ b_x(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x})]X_2^2 + \\
 &+ X_3[(c_r - c_{1r} - d_r)d_{1x} + d_{1r}(c_{1x} - c_x + d_x) + \\
 &+ b_r c_{2x} - b_x c_{2r}] + c_{2r}d_{1r} + c_{2x}d_{1x}; \\
 B_1 &= c_{2r}^2 + c_{2x}^2 + [(c_{1r} - c_r - d_{1r} + d_r)d_r + \\
 &+ d_x(c_{1x} - c_x - d_{1x} + d_x) + b_r c_{2r} + b_x c_{2x}]X_2^2 + \\
 &+ [(c_r - c_{1r} - 2d_r)c_{2x} + c_{2r}(c_{1x} - c_x + 2d_x)]X_3; \\
 C_1 &= -X_2^2(c_{2r}d_r + c_{2x}d_x); \\
 A_2 &= X_3[X_3(b_x d_r - b_r d_x) - b_r c_{2r} - b_x c_{2x} - \\
 &- d_r d_{1r} - d_x d_{1x}] - c_{2r}d_{1x} + c_{2x}d_{1r}; \\
 B_2 &= [(c_{2x} - d_r X_3)(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) - \\
 &- X_3(b_r c_{2r} + b_x c_{2x})]X_3 + \\
 &+ [-(c_{2r} + d_x X_3)(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}) + \\
 &+ c_{2r}(d_x - d_{1x}) - c_{2x}(d_r - d_{1r})]X_3 + \\
 &+ c_{2r}^2 + c_{2x}^2; \\
 C_2 &= X_3^2[(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})c_{2x} - \\
 &- c_{2r}(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x})] + X_3(c_{2r}^2 + c_{2x}^2).
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

При выборе комбинации  $R_1$ ,  $jX_3$  (рис. 6, в) в (16) надо положить  $X_1 = R_1$ ;  $X_2 = X_3$ :

$$\begin{aligned}
 A_1 &= [(c_{1r} - c_r + d_r)d_{1x} - d_{1r}(c_{1x} - c_x + d_x) + \\
 &+ b_r c_{2x} - b_x c_{2r}]X_2 + (b_r d_{1r} + b_x d_{1x})X_2^2 + \\
 &+ (c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})c_{2r} + c_{2x}(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}); \\
 C_1 &= -X_2^2(c_{2r}d_r + c_{2x}d_x); \\
 B_1 &= X_2^2(b_r c_{2r} + b_x c_{2x} - d_r d_{1r} - d_x d_{1x}) + \\
 &+ c_{2r}^2 + c_{2x}^2 - X_2[c_{2x}(c_r - c_{1r}) - c_{2r}(c_x - c_{1x})];
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_2 &= (c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})(c_{2x} - d_r X_2) - \\
 &- X_2(b_r c_{2r} + b_x c_{2x}) - X_2^2(b_r d_x - b_x d_r) - \\
 &- (c_{2r} + d_x X_2)(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x}); \\
 B_2 &= X_2[(c_{1x} - c_x + 2d_x - 2d_{1x})c_{2r} + \\
 &+ c_{2x}(c_r - c_{1r} - 2d_r + 2d_{1r})] - \\
 &- X_2^2(b_r c_{2r} + b_x c_{2x} + d_r d_{1r} + d_x d_{1x}) + c_{2r}^2 + c_{2x}^2; \\
 C_2 &= X_2(c_{2r}^2 + c_{2x}^2) - X_2^2(c_{2r}d_{1x} - c_{2x}d_{1r}).
 \end{aligned}$$

При выборе комбинации  $jX_2$ ,  $jX_3$  (рис. 6, в) в (16) надо положить  $X_1 = X_2$ ;  $X_2 = X_3$ :

$$\begin{aligned}
 A_1 &= (b_r c_{2r} + b_x c_{2x} + d_r d_{1r} - d_x d_{1x})R_1 - \\
 &- c_{2r}d_r - c_{2x}d_x + (b_r d_{1r} + b_x d_{1x})R_1^2; \\
 B_1 &= R_1^2[(c_{1r} - c_r + d_r)d_{1x} + b_r c_{2x} - \\
 &- b_x c_{2r} - d_{1r}(c_{1x} - c_x + d_x)] - \\
 &- R_1[(c_r - c_{1r})c_{2x} - c_{2r}(c_x - c_{1x})]; \\
 C_1 &= R_1(c_{2r}^2 + c_{2x}^2) + R_1^2[(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r})c_{2r} + \\
 &+ c_{2x}(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x})]; \\
 A_2 &= (b_r c_{2r} + b_x c_{2x})R_1 - (c_{2r}d_r + c_{2x}d_x) - \\
 &- [(d_r - R_1 b_r)(c_r - c_{1r} - d_r + d_{1r}) + \\
 &+ (d_x - R_1 b_x)(c_x - c_{1x} - d_x + d_{1x})]R_1; \\
 B_2 &= [(c_r - c_{1r} - d_r)d_{1x} + d_{1r}(c_{1x} - c_x + d_x) + \\
 &+ b_r c_{2x} - b_x c_{2r}]R_1^2 + R_1[(c_{1x} - c_x + 2d_x)c_{2r} - \\
 &- c_{2x}(c_{1r} - c_r + 2d_r)]; \\
 C_2 &= R_1(c_{2r}^2 + c_{2x}^2) + R_1^2(c_{2r}d_{1r} + c_{2x}d_{1x}).
 \end{aligned}$$

### 3. Математическое и схмотехническое моделирование динамических звеньев

На рис. 7–10 для примера показаны результаты теоретических и экспериментальных исследований принципиальной и эквивалентной схем узкополосного усилителя, соответствующих структурной схеме рис. 1, а, в виде их частотных характеристик.

В качестве НЭ использован транзистор типа ВФQ17РН, включенный по схеме с общей базой по высокой частоте (рис. 7, а). Схема НЧ выполнена в виде параллельно соединенных НЭ и ЦОС с П-образным соединением трех элементов  $C_{22}$ ,  $C_{23}$ ,  $R_{36}$ . Схема общей ЦОС построена в виде П-образного соединения трех элементов  $C_{25}$ ,  $C_{26}$ ,  $R_{46}$ . Нагрузка выполнена на элементе  $R_{47}$ . Сопротивление источника сигнала сформировано с помощью элемента  $R_{30}$ . Схема ССЧ собрана в виде П-образного четы-

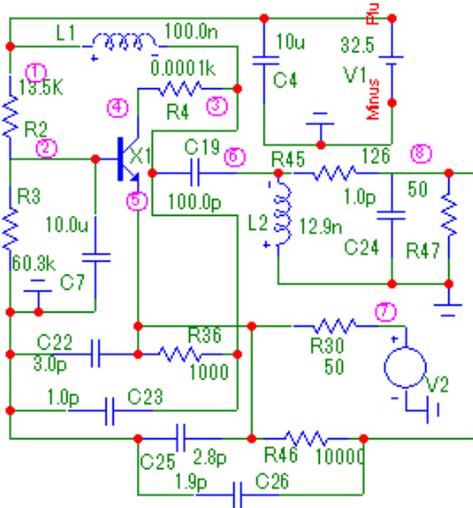


Рис. 7. Принципиальная схема узкополосного усилителя (а), соответствующая первой структурной схеме (рис. 1, а). АЧХ- и ФЧХ-усилители, полученные в системе MicroCap (б) и в системе MathCad (в), показаны на рис. 8  
Fig. 7. Schematic diagram of a narrow-band amplifier (а), corresponding to the first block diagram (Fig. 1, а). The frequency response and phase response of the amplifier obtained in the MicroCap system (b) and in the MathCad system (c) are shown in Fig. 8

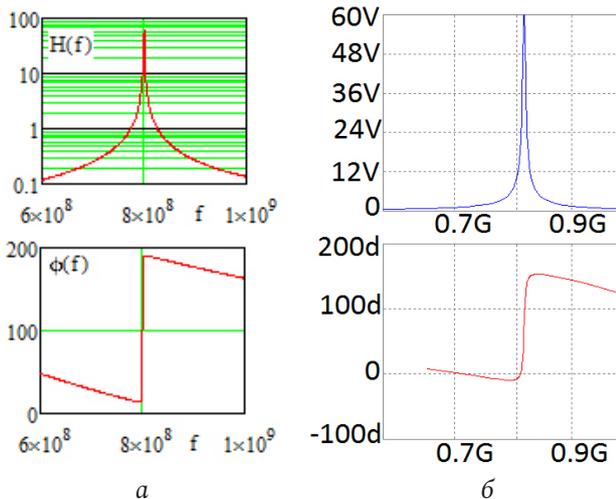


Рис. 8. АЧХ- и ФЧХ-усилители (рис. 7), полученные в системе MicroCap (а) и в системе MathCad (б)  
Fig. 8. Frequency response and phase response of the amplifier (Fig. 7), obtained in the MicroCap system (а) and in the MathCad system (b)

режполюсника на элементах  $L_2$ ,  $C_{24}$ ,  $R_{45}$ , параметры которых определялись по формулам (16), (19).

Эквивалентная схема транзистора выполнена в виде перекрытого Т-образного четырехполюсника на элементах  $L_{12}$ ,  $R_{10}$ ,  $C_{20}$ ,  $R_{13}$ ,  $R_{11}$ ,  $C_{21}$ ,  $R_9$ ,  $L_5$  (рис. 9).

Схема НЧ реализована в виде параллельно соединенных эквивалентной схемы нелинейного элемента и цепи обратной связи из П-образного соединения трех элементов  $C_8$ ,  $C_{15}$ ,  $R_{19}$ . Схема общей ЦОС построена в виде

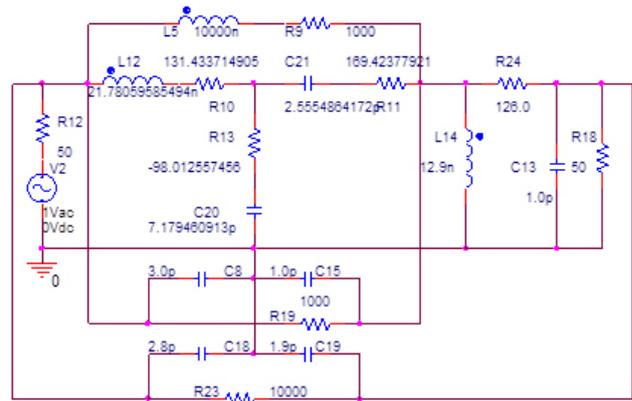


Рис. 9. Эквивалентная схема (а) узкополосного усилителя (рис. 7), соответствующая первой структурной схеме (рис. 1, а). АЧХ и ФЧХ, полученные в системе OrCad, показаны на рис. 10  
Fig. 9. Equivalent circuit (а) of a narrow-band amplifier (Fig. 7) corresponding to the first block diagram (Fig. 1, а). The frequency response and phase response obtained in the OrCad system are shown in Fig. 10

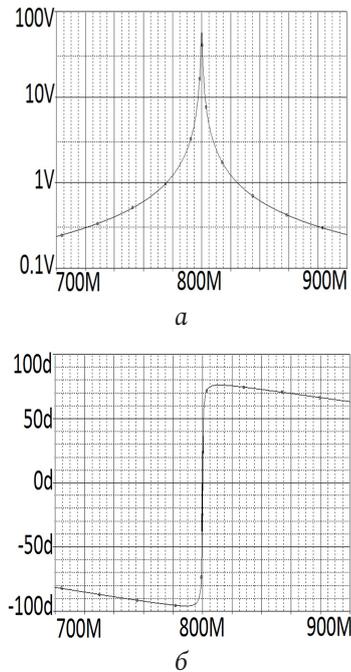


Рис. 10. АЧХ (а) и ФЧХ (б) эквивалентной схемы (рис. 9), полученные в системе OrCad  
Fig. 10. Frequency response (а) and phase response (b) of the equivalent circuit (Fig. 9), obtained in the OrCad system

П-образного соединения на основе трех элементов  $C_{18}$ ,  $C_{19}$ ,  $R_{23}$ , а схема ССЧ – на основе П-образного соединения трех элементов  $L_{14}$ ,  $R_{24}$ ,  $C_{13}$ .

### Заключение

Анализ показывает, что экспериментальные (рис. 8, а) частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) принципиальной схемы узкополосного усилителя (рис. 7) удовлетворительно совпадают с характеристиками эквивалентной схемы (рис. 9) усилителя,

полученные расчетным путем (рис. 8, б) и экспериментально (рис. 10). Резонансная частота эквивалентной схемы  $f \approx 800$  МГц (рис. 8, б и 10) незначительно отличается от резонансной частоты принципиальной схемы  $f \approx 812$  МГц (рис. 8, а). Произведение коэффициента усиления на полосу частот составляет примерно 200 МГц.

Таким образом, полученные математические модели ССЧ (10)–(21) могут быть использованы

для технического проектирования различных динамических звеньев автоматических систем управления с обратной связью с заданными частотными характеристиками. Результаты можно также использовать для формирования заданных АЧХ- и ФЧХ-фильтров и квазилинейных склонов АЧХ высокочастотных частей (до фильтра нижних частот) демодуляторов сигналов с угловой модуляцией.

### Список литературы

1. Головкин А.А., Головкин В.А. Параметрический синтез динамических звеньев радиоэлектронных систем управления для вариантов их включения между источником сигнала и нелинейной частью // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2019. № 3. С. 35–44.
2. Справочник по радиоэлектронике. Т. 3 / под ред. А.А. Куликовского. М.: Энергия, 1970. 413 с.
3. Авиационные системы радиоуправления / под ред. В.С. Вербы, В.И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2014. 376 с.
4. Головкин А.А., Головкин В.А. Параметрический синтез радиотехнических устройств и систем. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. 588 с.
5. Гуревич И.В. Основы расчетов радиотехнических цепей (линейные цепи при гармонических воздействиях). М.: Связь, 1975. 368 с.

### References

1. Golovkov A.A., Golovkov V.A. Parametric synthesis of dynamic links of radio-electronic control systems for options for their inclusion between the signal source and the nonlinear part. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravljajushchie sistemy*, 2019, no. 3, pp. 35–44. (In Russ.)
2. *Handbook of Radio Electronics*. Vol. 3. Ed. by A.A. Kulikovskiy. Moscow: Energija, 1970, 413 p. (In Russ.)
3. *Aircraft Radio Control Systems*. Ed. by V.S. Verby, V.I. Merkulov. Moscow: Radiotekhnika, 2014, 376 p. (In Russ.)
4. Golovkov A.A., Golovkov V.A. *Parametric Synthesis of Radio Engineering Devices and Systems*. Voronezh: VUNTs VVS «VVA», 2018, 588 p. (In Russ.)
5. Gurevich I.V. *Fundamentals of Calculations of Radio Circuits (Linear Circuits with Harmonic Effects)*. Moscow: Svjaz', 1975, 368 p. (In Russ.)

---

## Physics of Wave Processes and Radio Systems 2022, vol. 25, no. 2, pp. 40–50

DOI 10.18469/1810-3189.2022.25.2.40-50

Received 29 July 2021  
Accepted 30 August 2021

# Parametrical synthesis of dynamic links for variants of their inclusion between a nonlinear part and loading of automatic systems of radio management with the general feedback

Alexander A. Golovkov , Vladimir A. Golovkov

Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh)  
the Ministry of Defence of the Russian Federation  
54a, Staryh Bolshevikov Street,  
Voronezh, 394064, Russia

**Abstract – Introduction:** the analysis of the known literature shows that the use of various types of matching quadripoles (reactive, resistive, complex, mixed) and the feedback circuit covering the non-linear element makes it possible to increase the area of physical feasibility of the given forms of frequency characteristics. **The purpose of the work** is to increase the area of physical feasibility of given forms of frequency responses by optimizing the parameters of matching mixed quadripoles and using an additional feedback circuit covering a nonlinear element and a mixed quadripole. One part of such quadripoles consists only of resistive elements, and the second – only of reactive elements. **Materials and methods:** theory of four-terminal networks, matrix algebra, decomposition method, method of synthesis of microwave control devices, circuit engineering method for analyzing the characteristics of radio devices. **Results:** Mathematical models of matching mixed quadripoles are obtained in the form of relationships between the elements of their transmission matrix and the dependences of the resistances of their two-terminals on frequency, which are optimal in terms of the criterion for providing specified forms of frequency characteristics. **Conclusion:** a comparative analysis of the theoretical results (frequency response and phase response of amplifiers) obtained by mathematical

modeling in the MathCad system and experimental results obtained by circuit simulation in the OrCad and MicroCap systems shows their satisfactory agreement.

*Keywords* – parametrical synthesis matching by the mixed two-port networks; the set forms of frequency characteristics of intensifying links.

## Информация об авторах

**Головков Александр Афанасьевич**, доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, профессор кафедры авиационных систем и комплексов радионавигации и радиосвязи ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия. Автор 660 научных работ.

*Область научных интересов:* способы и средства формирования и обработки сигналов, приема, передачи, защиты и разрушения информации.

*E-mail:* valgol2595@gmail.com

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-8468-0055>

**Головков Владимир Александрович**, младший научный сотрудник отдела ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* способы и средства формирования и обработки сигналов, приема, передачи информации.

*E-mail:* valgol2595@gmail.com

## Information about the Authors

**Alexander A. Golovkov**, Doctor of Technical Sciences, professor, honored inventor of the Russian Federation, professor of the Department of Aviation Systems and Complexes of Radio Navigation and Radio Communication, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation, Voronezh, Russia.

*Research interests:* ways and means of generating and processing signals, receiving, transmitting, protecting and destroying information.

*E-mail:* valgol2595@gmail.com

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-8468-0055>

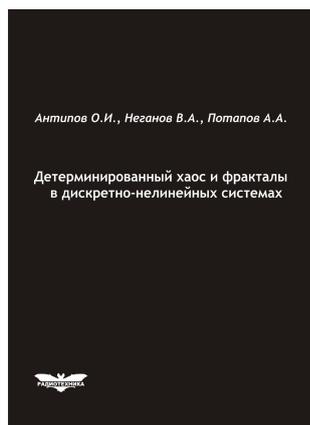
**Vladimir A. Golovkov**, junior scientist of the Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation, Voronezh, Russia.

*Research interests:* ways and means of generating and processing signals, receiving and transmitting information.

*E-mail:* valgol2595@gmail.com

**Антипов, О.И.**

**Детерминированный хаос и фракталы в дискретно-нелинейных системах** / О.И. Антипов, В.А. Неганов, А.А. Потапов. – М.: Радиотехника, 2009. – 235 с., ил.



ISBN 978-5-88070-237-4

УДК 530.1:621.372+621.396

ББК 32.96

В монографии рассмотрены явления детерминированного хаоса и фрактальности в дискретно-нелинейных системах на примере устройств импульсной силовой электроники, приведены некоторые основные определения современной нелинейной динамики и некоторые математические методы целочисленных и дробных мер.

Представленные явления стохастической работы могут наблюдаться в широком классе систем с переменной структурой, действие которых может быть описано системами дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, скачкообразно меняющими свои значения с течением времени в зависимости от состояния системы. Объектами исследования явились импульсные стабилизаторы напряжения различных типов и структур. Научной новизной является применение как фрактальных, так и мультифрактальных мер детерминированного хаоса к анализу стохастической работы импульсных стабилизаторов.

*Для специалистов, интересующихся проблемами детерминированного хаоса, численным моделированием дискретно-нелинейных систем.*