

**Ульяновский государственный технический  
университет**

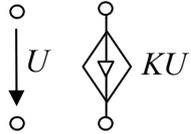
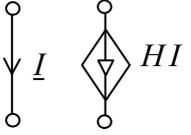
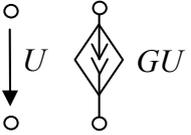
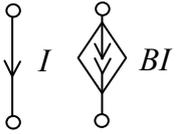
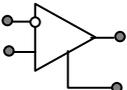
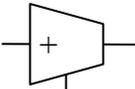
**К. С. ГОРШКОВ**

**СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ  
И СИМВОЛЬНЫЙ ДОПУСКОВЫЙ АНАЛИЗ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ  
МЕТОДОМ СХЕМНЫХ ОПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ**

**ПЛАКАТЫ К ДОКЛАДУ  
по кандидатской диссертации  
КОПИИ**

**Ульяновск 2010**

## СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ИНУН	Источник напряжения, управляемый напряжением
ИНУТ	Источник напряжения, управляемый током
ИТУН	Источник тока, управляемый напряжением
ИТУТ	Источник тока, управляемый током
ЛЭЦ	Линейная электрическая цепь
МСО	Метод схемных определителей
нуллатор	Направленный нумерованный взвешенный нуллятор
нуллор	Направленный нумерованный взвешенный нуллор
норатор	Направленный нумерованный взвешенный норатор
ПСФ	Полиномиальная схемная функция
ПУР	Показатель участия ребра
САФ	Схемно-алгебраическая формула
ССФ	Символьная схемная функция
УИ	Управляемый источник
ЭДС	Электродвижущая сила
	Источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН)
	Источник напряжения, управляемый током (ИНУТ)
	Источник тока, управляемый напряжением (ИТУН)
	Источник тока, управляемый током (ИТУТ)
	Операционный усилитель (ОУ)
	Транскондуктивный усилитель

## НАИМЕНОВАНИЕ ПЛАКАТОВ

	с.
1. Основы теории схемных определителей	4
2. Положения, выносимые на защиту	5
3. Алгоритм восстановления схем по их ССФ	6
4. Пример восстановления схемы на основе заданной ССФ	7
5. Исключение изоморфных структур в процессе структурного синтеза	8
6. Алгоритм структурного синтеза схем по их ПСФ	9
7. Критерии выбора оптимальных схемных решений	10
8. Структурный синтез LC-цепи формы Каура на основе ПСФ	11
9. Структурный синтез LC-цепи формы Фостера на основе ПСФ	12
10. Структурный синтез ARC-фильтра	13
11. Параметрический синтез ARC-фильтра	14
12. Программы структурного синтеза SymSyn и InterSyn	15
13. Схемное решение системы уравнений	16
14. Транскондуктивная реализация структурных схем электрических цепей	17
15. Программа транскондуктивной реализации SchemeConverter	18
16. Схемный подход к допусковому анализу	19
17. Схемно-алгебраические формулы для нахождения допусков	20
18. Схемно-алгебраические формулы для определения погрешности	21
19. Допусковый анализ транзисторного усилителя	22
20. Компьютерная программа допускового анализа Toleralize	23
21. Основные результаты диссертационной работы	24

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ СХЕМНЫХ ОПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ

## ФОРМУЛЫ ВЫДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ПРОВОДИМОСТИ [В.Фойснер.–1902, 1904]

$$\Delta = z\Delta^z + \Delta_z$$

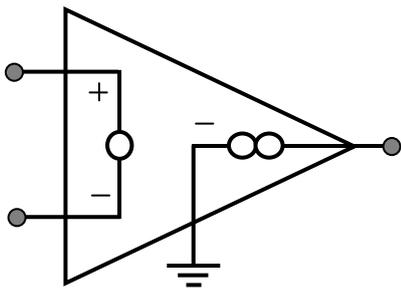
$$\Delta = y\Delta_y + \Delta^y$$

## ФОРМУЛА ВЫДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ [В.В.Филаретов.–1998, 2001]

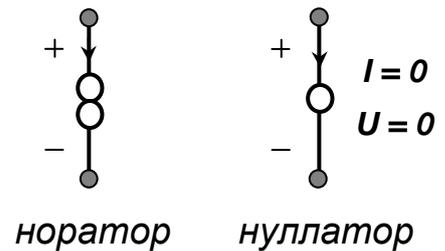
$$\Delta = \chi \Delta (\chi \Rightarrow \text{нуллор}) + \Delta (\chi = 0),$$

$$\chi \in \{R, g, K, G, H, B\}.$$

## ИДЕАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ТЕЛЛЕГЕНА ИЛИ НЕНАПРАВЛЕННЫЙ НУЛЛОР (1954)



идеальный ОУ (нуллор)

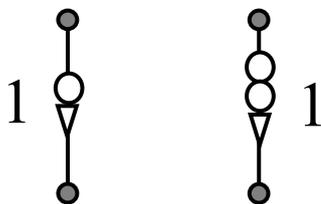


норатор

нуллатор

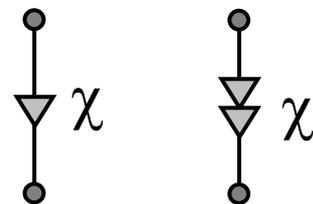
## НАПРАВЛЕННЫЙ НУЛЛОР

нумерованный



[Я.Браун.–1966]

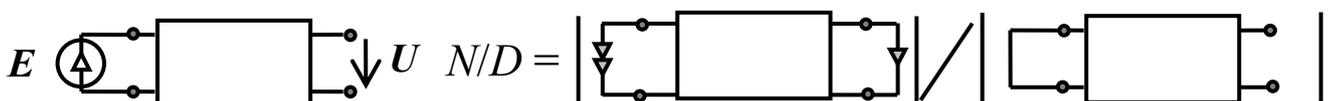
взвешенный



[В.В.Филаретов.–1996]

## ФОРМУЛЫ ДЛЯ ВХОДНЫХ И ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ

[Я.Браун.–1966]



# **ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

**1. Методика восстановления линейных электрических цепей по символьной схемной функции (ССФ), основанная на формулах В. Фойснера для выделения двухполюсных элементов и их обобщениях.**

**2. Методика структурного синтеза линейных электрических цепей по полиномиальной схемной функции (ПСФ), не имеющая ограничений на тип используемых элементов, обеспечивающая получение полного класса схем, удовлетворяющих заданной функции, исключение изоморфных структур и выбор оптимальных схемных решений.**

**3. Методика реализации структурных схем электрических цепей на основе новой элементной базы – транскондуктивных усилителей, – не требующий применения условий настройки (согласования параметров).**

**4. Методика определения влияния допусков элементов на коэффициент преобразования электрической цепи.**

# АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СХЕМ ПО ИХ ССФ

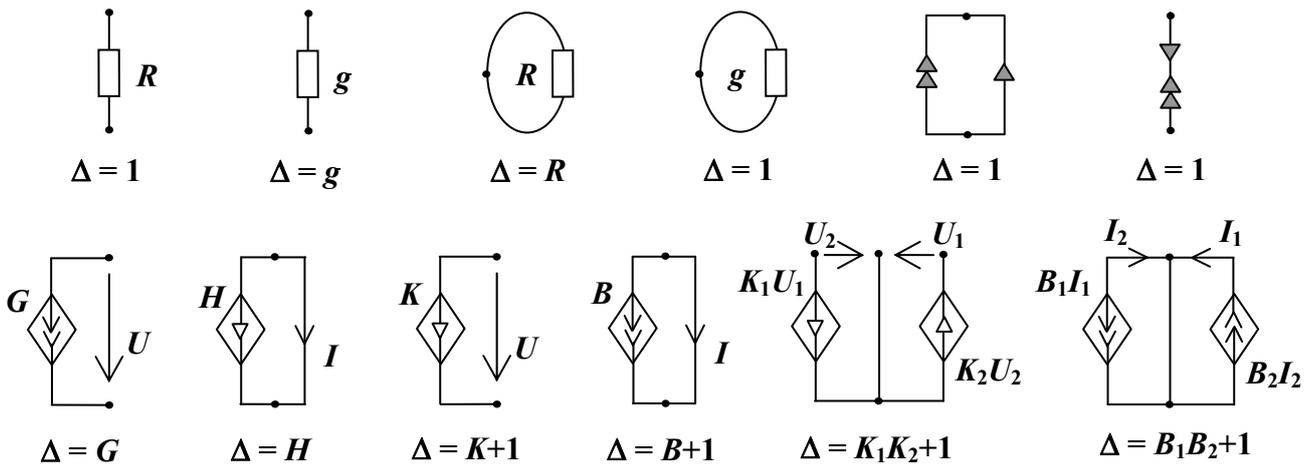
ТРЕБУЕТСЯ ВОССТАНОВИТЬ ССФ:

$S=N_n / D_n$ , где  $n$  – число элементов :  $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_m, \chi_n$ .

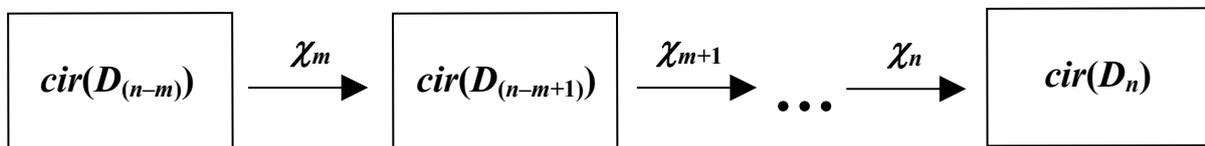
## 1. ПОВТОРНАЯ ЧАСТИЧНАЯ СВЕРТКА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ССФ

$$D_n = \chi_1 \cdot \underbrace{\left( \chi_2 \cdot \left( \overbrace{(\dots)}^{D^{(n-2)a}} + \overbrace{(\dots)}^{D^{(n-2)b}} \right) \right)}_{D^{(n-1)a}} + \underbrace{\left( \chi_2 \cdot \left( \overbrace{(\dots)}^{D'^{(n-2)a}} + \overbrace{(\dots)}^{D'^{(n-2)b}} \right) \right)}_{D^{(n-1)b}}$$

## 2. ВЫБОР ПРОСТЕЙШЕЙ СХЕМЫ $cir(D_{(n-m)})$



## 3. НАРАЩИВАНИЕ ПРОСТЕЙШЕЙ СХЕМЫ ДО МНОЖЕСТВА СХЕМНЫХ ВЫРАЖЕНИЙ $cir(D_n)$



## 4. ПОДКЛЮЧЕНИЕ НЕЗАВИСИМОГО ИСТОЧНИКА И ВЕТВИ ИСКОМОГО ОТКЛИКА К СХЕМАМ МНОЖЕСТВА $cir(D_n)$ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МНОЖЕСТВА СХЕМ $cir(S)$ , СООТВЕТСТВУЮЩИХ ЗАДАННОЙ ССФ

## 5. ИСКЛЮЧЕНИЕ ИЗ МНОЖЕСТВА $cir(S)$ ИЗОМОРФНЫХ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ

# ПРИМЕР ВОССТАНОВЛЕНИЯ СХЕМЫ НА ОСНОВЕ ЗАДАННОЙ ССФ

**ЗАДАНА ССФ  $N/D=U/E$  ОПЕРАЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

$$N_8 = pC_1pL_1BIR_2r_1KU + pC_1pL_1BIR_2r_1 + pC_1pL_1R_1r_1 - pC_1pL_1K_1 R_1R_2$$

$$D_8 = -Blr_1r_2 - Blr_1pL_1 + KU r_1R_2R_1pC_1 + KU r_1R_2 + pC_1R_1R_2r_1 + pC_1R_1R_2r_2 + pC_1R_1R_2pL_1 + pC_1R_1r_1r_2 + pC_1R_1r_1pL_1 + R_1r_1 + R_1r_2 + R_1pL_1 + R_2r_1 + R_2r_2 + R_2pL_1 + r_1r_2 + r_1pL_1.$$

**Выделяем из  $D_8$  параметр  $KU$ :**

$$D_7 = -Blr_1r_2 - Blr_1pL_1 + pC_1R_1R_2r_1 + pC_1R_1R_2r_2 + pC_1R_1R_2pL_1 + pC_1R_1r_1r_2 + pC_1R_1r_1pL_1 + R_1r_1 + R_1r_2 + R_1pL_1 + R_2r_1 + R_2r_2 + R_2pL_1 + r_1r_2 + r_1pL_1.$$

$$D_7(BI=0): \quad D_6 = pC_1R_1R_2r_1 + pC_1R_1R_2r_2 + pC_1R_1R_2pL_1 + pC_1R_1r_1r_2 + pC_1R_1r_1pL_1 + R_1r_1 + R_1r_2 + R_1pL_1 + R_2r_1 + R_2r_2 + R_2pL_1 + r_1r_2 + r_1pL_1.$$

$$D_6(pC_1=0): \quad D_5 = R_1r_1 + R_1r_2 + R_1pL_1 + R_2r_1 + R_2r_2 + R_2pL_1 + r_1r_2 + r_1pL_1.$$

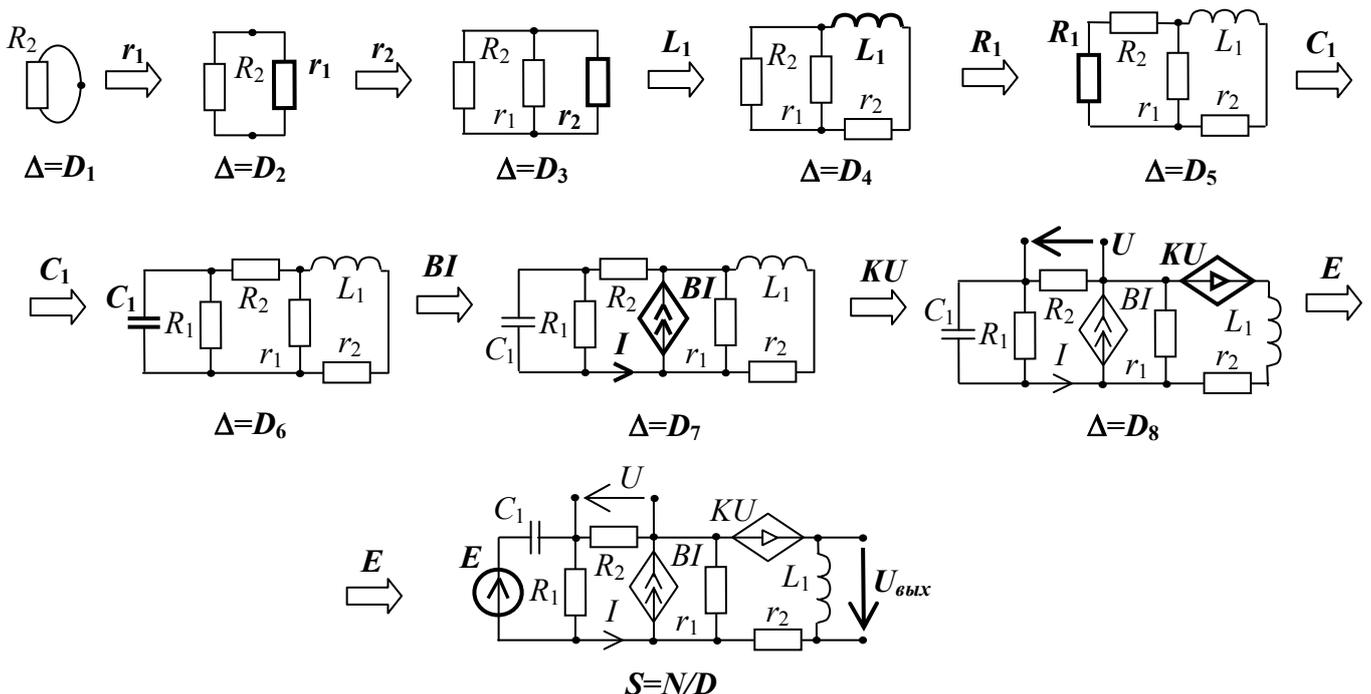
$$D_5(R_1=0): \quad D_4 = R_2r_1 + R_2r_2 + R_2pL_1 + r_1r_2 + r_1pL_1.$$

$$D_4(pL_1=0): \quad D_3 = R_2r_1 + R_2r_2 + r_1r_2.$$

$$D_3(r_2 \rightarrow \infty): \quad D_2 = R_2 + r_1.$$

$$D_2(r_1=0): \quad D_1 = R_2.$$

**ПРОВОДИМ НАРАЩИВАНИЕ ПРОСТЕЙШЕЙ СХЕМЫ  $cir(D_1)$**



# ИСКЛЮЧЕНИЕ ИЗОМОРФНЫХ СТРУКТУР В ПРОЦЕССЕ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УЧАСТИЯ РЕБЕР (ПУР) ГРАФА  $G$**

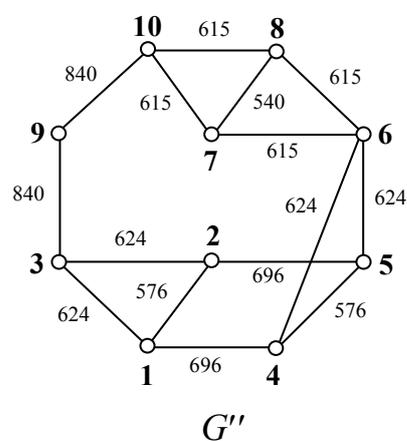
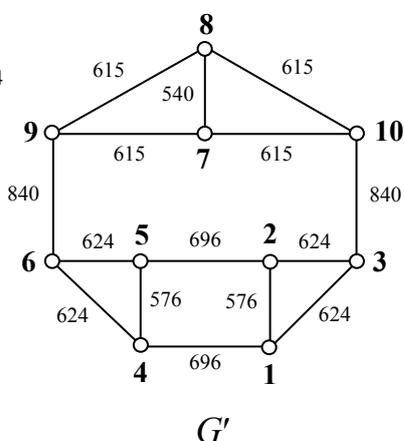
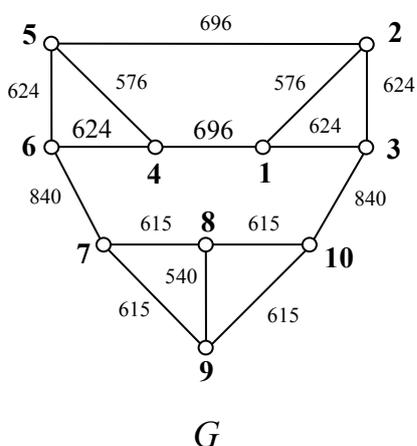
$$G = \{T_i, i \in I\}, \text{ где } I = \{1, 2, \dots, n\}.$$

**КРИТЕРИИ РЕБЕРНОГО И ВЕРШИННОГО ИЗОМОРФИЗМА**

$$P=P'$$

$$B=B'$$

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАФОВ  $G$ ,  $G'$  и  $G''$  НА ИЗОМОРФИЗМ**



**ТАБЛИЦЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УЧАСТИЯ РЕБЕР  
И ПОКАЗАТЕЛЕЙ УЧАСТИЯ ВЕРШИН ГРАФОВ  $G$ ,  $G'$  И  $G''$**

Бинарные отношения графов			ПУР
$G$	$G'$	$G''$	
9 - 10	7 - 10	7 - 10	615
8 - 10	10 - 8	10 - 8	615
3 - 10	6 - 9	3 - 9	840
9 - 8	7 - 8	7 - 8	540
9 - 7	9 - 7	6 - 7	615
8 - 7	9 - 8	6 - 8	615
7 - 6	3 - 10	9 - 10	840
6 - 4	6 - 4	6 - 4	624
6 - 5	6 - 5	6 - 5	624
5 - 4	5 - 4	5 - 4	576
1 - 4	1 - 4	1 - 4	696
2 - 5	2 - 5	2 - 5	696
1 - 3	1 - 3	1 - 3	624
1 - 2	1 - 2	1 - 2	576
3 - 2	3 - 2	3 - 2	624

$$P=P'=P''$$

Номер вершины	Показатели участия вершин графа $G$	Показатели участия вершин графа $G'$	Показатели участия вершин графа $G''$
1	576, 624, 696	576, 624, 696	576, 624, 696
2	576, 624, 696	576, 624, 696	576, 624, 696
3	624, 624, 840	624, 624, 840	624, 624, 840
4	576, 624, 696	576, 624, 696	576, 624, 696
5	576, 624, 696	576, 624, 696	576, 624, 696
6	624, 624, 840	624, 624, 840	615, 615, 624, 624
7	615, 615, 840	540, 615, 615	540, 615, 615
8	540, 615, 615	540, 615, 615	540, 615, 615
9	540, 615, 615	615, 615, 840	840, 840
10	615, 615, 840	615, 615, 840	615, 615, 840

$$B=B' \neq B''$$

# АЛГОРИТМ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА СХЕМ ПО ИХ ПСФ

**ЗАДАННАЯ ФУНКЦИЯ:**      **КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОСТИ СИНТЕЗА:**

$$S(p) = \frac{N_n}{D_n} = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_0}$$

- 1) кол-во  $C \rightarrow \min$ , 2) кол-во  $L \rightarrow \min$ ,  
3) кол-во  $LC \rightarrow \min$ , 4) кол-во  $R, L, C \rightarrow \min$ ,  
5) кол-во  $K, G, H, B \rightarrow \min$

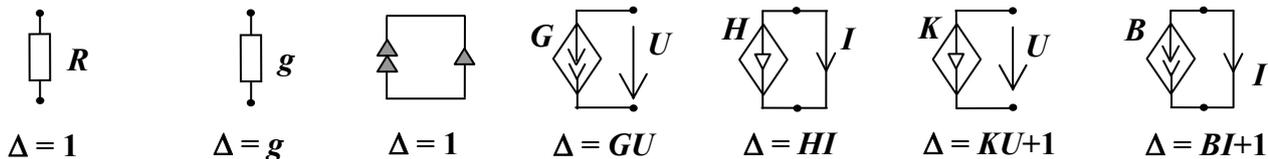
## 1. РАЗЛОЖЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ СХЕМНОЙ ФУНКЦИИ

$$D_0 = b_0, \quad D_1 = b_1 p + D_0, \quad D_2 = b_2 p^2 + D_1, \quad \dots, \quad D_n = b_n p^n + D_{n-1},$$

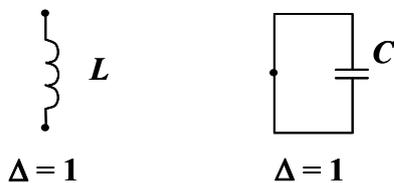
где  $n$  – максимальная степень ПСФ и количество реактивных элементов в подсхеме

## 2. ВЫБОР НАЧАЛЬНОЙ СХЕМЫ

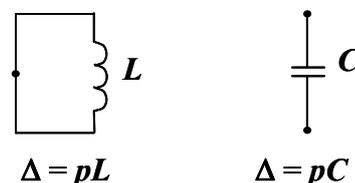
если  $b_0 \neq 0, b_1 \neq 0$ :



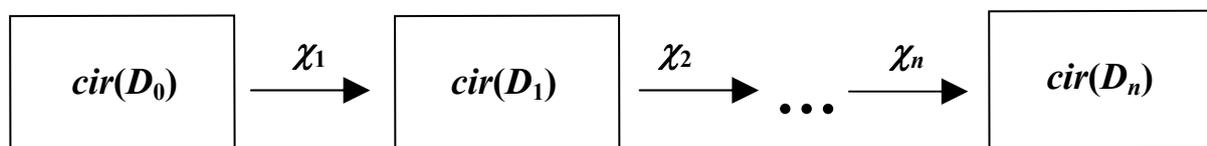
если  $b_0 \neq 0, b_1 = 0$ :



если  $b_0 = 0, b_1 \neq 0$ :



## 3. НАРАЩИВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СХЕМЫ ДО МНОЖЕСТВА СХЕМ $cir(D_n)$ , СООТВЕТСТВУЮЩИХ ЗНАМЕНАТЕЛЮ ПСФ



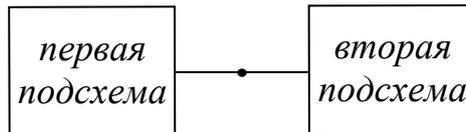
## 4. ПОДКЛЮЧЕНИЕ НЕЗАВИСИМОГО ИСТОЧНИКА И ВЕТВИ ИСКАМОГО ОТКЛИКА К СХЕМАМ МНОЖЕСТВА $cir(D_n)$ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МНОЖЕСТВА СХЕМ $cir(S)$ , СООТВЕТСТВУЮЩИХ ЗАДАННОЙ ФУНКЦИИ

## 5. ИСКЛЮЧЕНИЕ ИЗ МНОЖЕСТВА $cir(S)$ ИЗОМОРФНЫХ СТРУКТУР И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ

# КРИТЕРИИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ

## СТРУКТУРНЫЕ КРИТЕРИИ ИСКЛЮЧЕНИЯ НЕТЕХНОЛОГИЧНЫХ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ

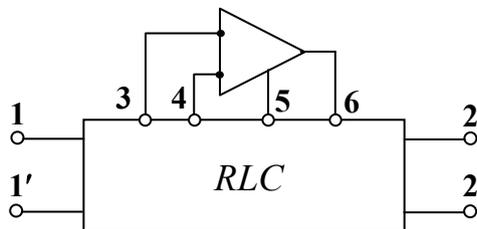
### 1. Бисекция по одному узлу



### 2. Некорректное включение активных элементов (активный элемент нейтрализуется)



### 3. Отсутствие у активного элемента общей точки с внешним источником



## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СХЕМНОГО РЕШЕНИЯ

- 1) параметрический синтез на основе метода компонентных уравнений [А.А. Ланнэ, Е.Д. Михайлова.–1982] для определения численных значений параметров элементов полученных схем;
- 2) анализ частотных характеристик, построение амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик;
- 3) допусковой анализ для определения схем, обладающих наименьшей чувствительностью.

# СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ LC-ЦЕПИ ФОРМЫ КАУЭРА НА ОСНОВЕ ПСФ

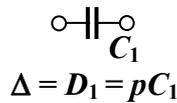
## РЕАЛИЗОВАТЬ СХЕМУ LC-ДВУХПОЛЮСНИКА

$$Z(p) = \frac{45p^4 + 27p^2 + 1}{60p^3 + 5p}, \quad \text{кол-во LC} \rightarrow \min.$$

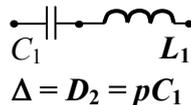
Раскладываем знаменатель заданной функции на подвыражения:

$$D_0=0, \quad D_1=D_2=b_1p, \quad D_3=D_4=b_3p^3 + D_2.$$

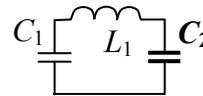
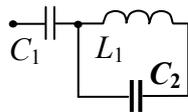
Выбираем начальную схему в соответствии с условием  $b_0=0, b_1 \neq 0$ , и наращиваем ее до получения множества схем  $\text{cir}(D_n)$ :



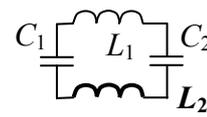
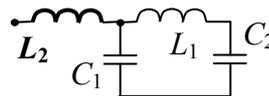
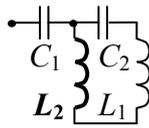
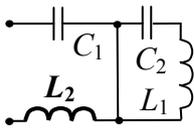
подключаем  $L_1$



подключаем  $C_2$

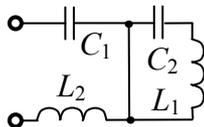


подключаем  $L_2$ , получаем множество схем соответствующих  $\text{cir}(D_n)$ :

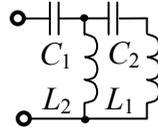


$$D_{4a} = pC_1(pC_2pL_1+1); \quad D_{4b} = pC_1(pC_2(pL_1+pL_2)+1); \quad D_{4c} = pC_1(pC_2pL_1+1)+pC_2; \\ D_{4d} = pC_1pC_2(pL_1+pL_2)+pC_1+pC_2.$$

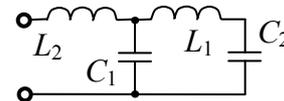
Согласно четвертому шагу алгоритма получаем множество схем  $\text{cir}(S)$ :



$Z_a(p)$



$Z_b(p)$



$Z_c(p)$

$$Z_a(p) = \frac{pC_1pL_2(pL_1pC_2+1)+pC_2pL_1+1}{pC_1(pC_2pL_1+1)}$$

$$Z_b(p) = Z_c(p) = \frac{pC_1pC_2pL_1pL_2+pC_2(pL_1+pL_2)+pC_1pL_2+1}{pC_1(pC_2(pL_1+pL_2)+1)}$$

Схема  $Z_a$  исключается из множества схем  $\text{cir}(S)$  согласно критерию бисекции по одному узлу.

Схемы  $Z_b$  и  $Z_c$  являются соответственно первой и второй формами Кауэра.

# СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ LC-ЦЕПИ ФОРМЫ ФОСТЕРА НА ОСНОВЕ ПСФ

## РЕАЛИЗОВАТЬ СХЕМУ LC-ДВУХПОЛЮСНИКА

$$Z(p) = \frac{10^6 \cdot p^3 + 1,5 \cdot 10^{14} p}{p^4 + 2 \cdot 10^8 p^2 + 0,51 \cdot 10^6}, \quad \text{кол-во LC} \rightarrow \min.$$

Раскладываем знаменатель заданной функции на подвыражения:

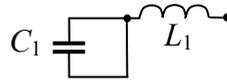
$$D_0=0, \quad D_1=D_2=1, \quad D_3=b_2 p^2 + D_1, \quad D_4=b_4 p^4 + D_3.$$

Выбираем начальную схему в соответствии с условием  $b_0 \neq 0, b_1 = 0$ , и наращиваем ее до получения множества схем  $\text{cir}(D_n)$ :



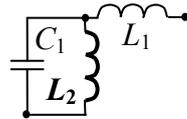
$$\Delta = D_1 = 1$$

подключаем  $C_1$



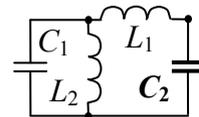
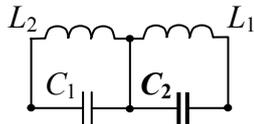
$$\Delta = D_2 = 1$$

подключаем  $L_1$



$$\Delta = D_3 = pC_1 pL_2 + 1$$

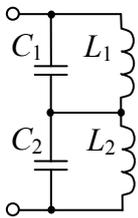
подключаем  $L_2$ , получаем множество схем соответствующих  $\text{cir}(D_n)$ :



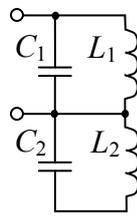
$$\Delta = D_4 = pC_1(pC_2 pL_1 pL_2 + pL_2) + pC_2 pL_1 + 1$$

$$\Delta = D_{4b} = pC_2(pC_1 pL_1 pL_2 + (pL_1 + pL_2)) + pC_1 pL_2 + 1$$

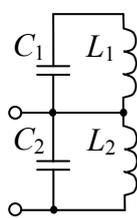
Согласно четвертому шагу алгоритма получаем множество схем  $\text{cir}(S)$ :



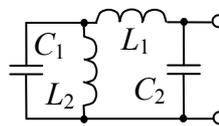
$Z_a(p)$



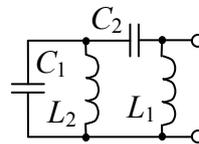
$Z_b(p)$



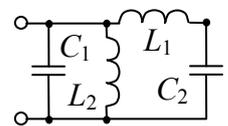
$Z_c(p)$



$Z_d(p)$



$Z_e(p)$



$Z_f(p)$

$$Z_a(p) = \frac{(pC_1 + pC_2)(pL_1 pL_2) + pL_1 + pL_2}{pC_1(pC_2 pL_1 pL_2 + pL_2) + pC_2 pL_1 + 1}$$

$$Z_f(p) = \frac{pL_2(pL_1 pC_2 + 1)}{pC_2(pC_1 pL_1 pL_2 + (pL_1 + pL_2)) + pC_1 pL_2 + 1}$$

Схема  $Z_b$  и  $Z_c$  исключаются из множества схем  $\text{cir}(S)$  согласно критерию бисекции по одному узлу.

Схемы  $Z_a$  и  $Z_f$  являются соответственно первой и второй формами Фостера.

# СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ARC-ФИЛЬТРА

## РЕАЛИЗОВАТЬ СХЕМУ ARC-ФИЛЬТРА

[Mancini R.-2002]

$$S(p) = 1/(p^3 + 2p^2 + 2p + 1), \quad \text{кол-во ARC} \rightarrow \min.$$

Раскладываем знаменатель заданной функции на подвыражения:

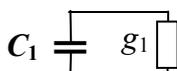
$$D_0=1, \quad D_1=b_1p + D_0, \quad D_2=b_2p^2 + D_1, \quad D_3=b_3p^3 + D_2.$$

Выбираем начальную схему в соответствии с условием  $b_0 \neq 0, b_1 \neq 0$ , и наращиваем ее до получения множества схем  $\text{cir}(D_n)$ :



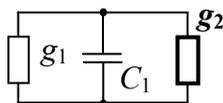
$$\Delta = D_0$$

подключаем  $C_1$



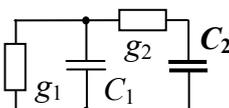
$$\Delta = D_1$$

подключаем  $g_2$



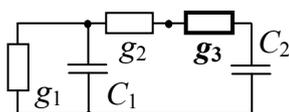
$$\Delta = D_1$$

подключаем  $C_2$



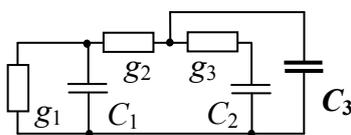
$$\Delta = D_2$$

подключаем  $g_3$



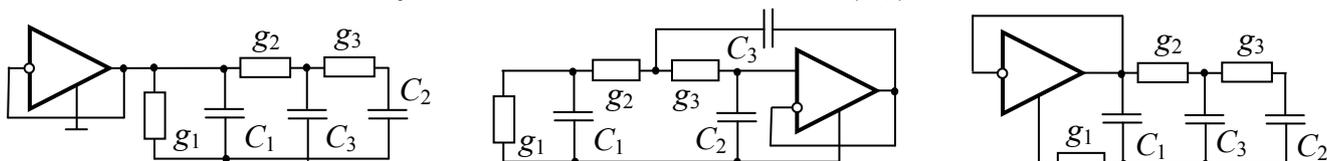
$$\Delta = D_2$$

подключаем  $C_3$

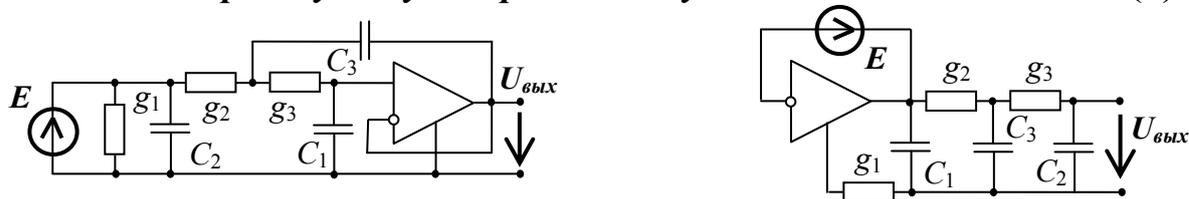


$$\Delta = D_3$$

подключаем ОУ, получаем множество схем  $\text{cir}(D_n)$ :

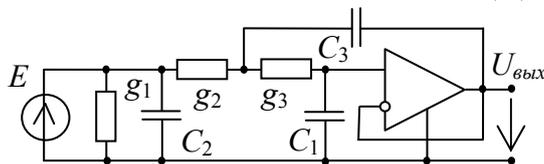


Согласно четвертому шагу алгоритма получаем множество схем  $\text{cir}(S)$ :



# ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АРС-ФИЛЬТРА

## АРС-ФИЛЬТР НИЖНИХ ЧАСТОТ 3-ГО ПОРЯДКА ПО БАТТЕРВОРТУ



### ФУНКЦИЯ БАТТЕРВОРТА В НОРМИРОВАННОМ ОТНОСИТЕЛЬНО ЧАСТОТЫ СРЕЗА ВИДЕ

$$S(p) = 1/(p^3 + 2p^2 + 2p + 1)$$

### СИМВОЛЬНАЯ СХЕМНАЯ ФУНКЦИЯ ФИЛЬТРА

$$S(p) = \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_4 C_5 C_6 p^3 + C_6 [R_3 C_5 (R_1 + R_2) + R_1 C_4 (R_2 + R_3)] p^2 + [R_1 C_4 + C_6 (R_1 + R_2 + R_3)] p + 1}$$

### СИСТЕМА КОМПОНЕНТНЫХ УРАВНЕНИЙ

$$\omega_c^3 R_1 R_2 R_3 C_4 C_5 C_6 = 1; \quad \omega_c^2 C_6 [R_3 C_5 (R_1 + R_2) + R_1 C_4 (R_2 + R_3)] = 2;$$

$$\omega_c C_6 (R_1 + R_2 + R_3) = 2;$$

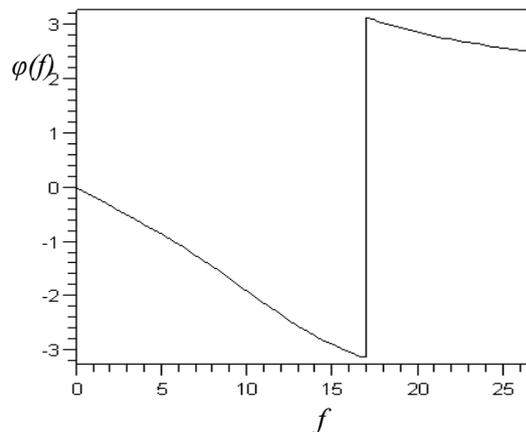
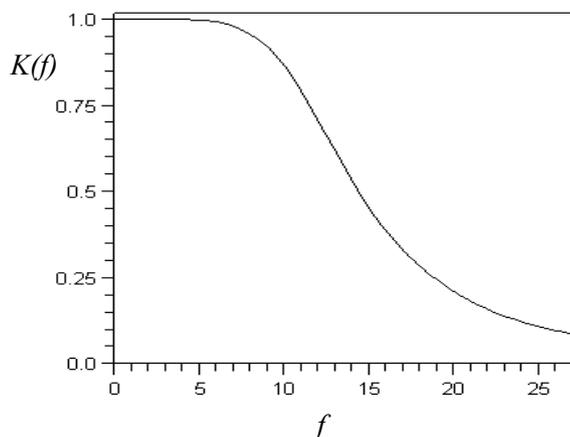
где  $\omega_c = 2\pi f_c$  – циклическая частота среза фильтра, при этом  $f_c$  – частота среза. Считаем, что  $R_1 = R_3 = R$ ,  $R_2 = 2R$ . Положим, что  $f_c = 12$  кГц и  $R = 1$  кОм.

### РАСЧЕТ ЧИСЛЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ MAPLE

Используем оператор *solve*, получаем

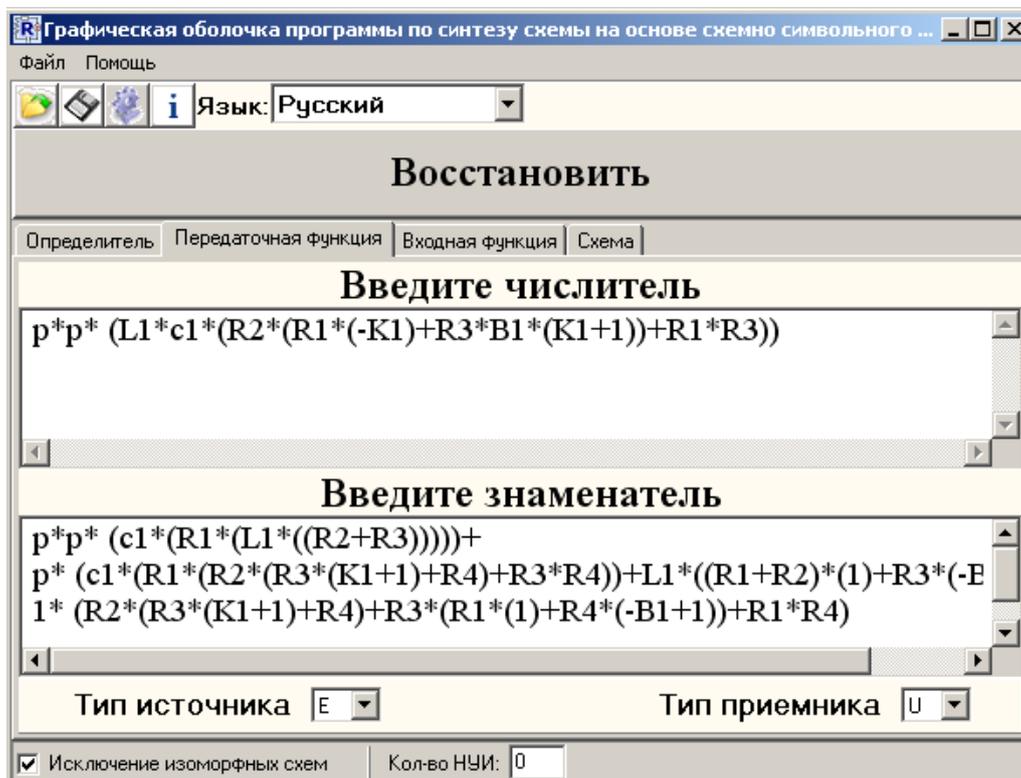
$$C_4 := 0.1561959410e-7 \text{ Ф}; \quad C_5 := 0.2739064545e-7 \text{ Ф}; \quad C_6 := 0.2726557435e-8 \text{ Ф}.$$

### АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНАЯ И ФАЗО-ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА

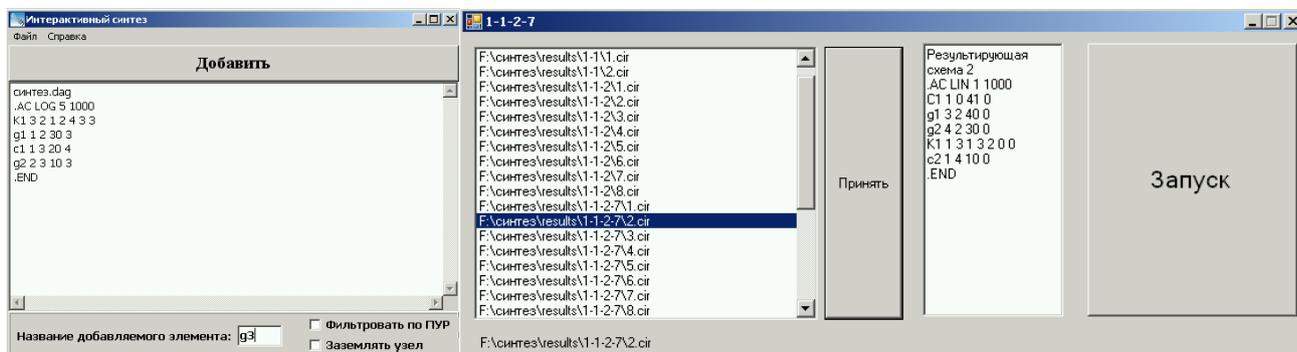


# ПРОГРАММЫ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА SYMSIN И INTERSYN

## SYMSIN – ПРОГРАММА СИНТЕЗА СХЕМ ПО ИХ ССФ



## INTERSYN – ПРОГРАММА СИНТЕЗА СХЕМ ПО ИХ ПОЛИНОМИАЛЬНЫМ СХЕМНЫМ ФУНКЦИЯМ



# СХЕМНОЕ РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ

## СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ СИГНАЛЬНОГО ГРАФА [Mason S. J. – 1953]

$$X = A X + B X_0$$

$n \times 1$     $n \times n$     $n \times 1$     $n \times m$     $m \times 1$

общий вид

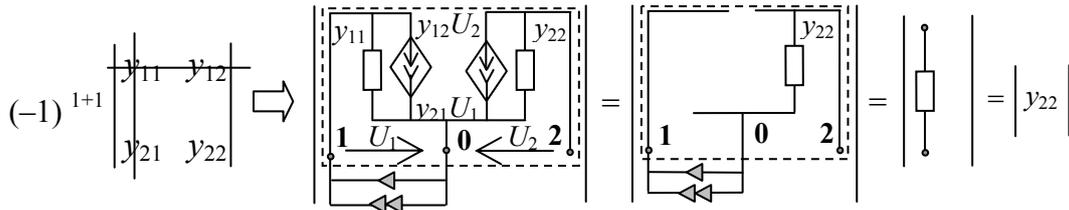
$$[1 - A] X = B X_0$$

$n \times n$     $n \times 1$     $n \times m$     $m \times 1$

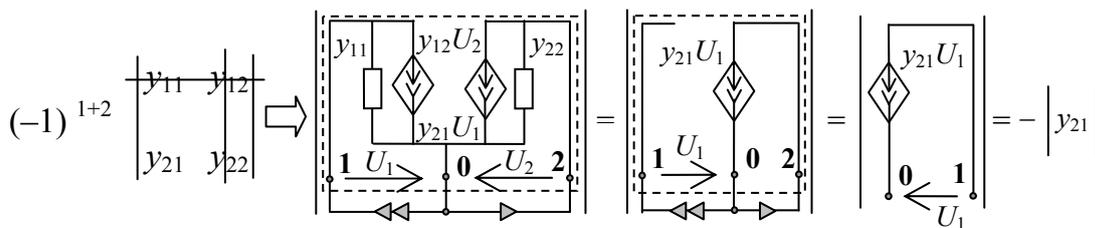
явная форма

### СХЕМНОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ МАТРИЦ

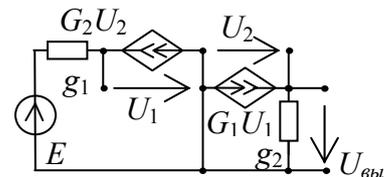
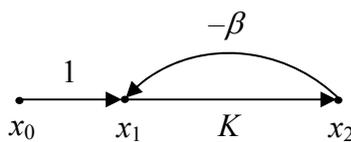
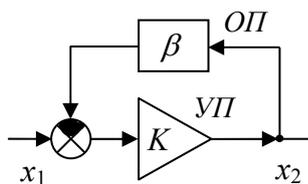
Получение алгебраического дополнения  $\Delta_{11}$  для матрицы второго порядка:



Получение алгебраического дополнения  $\Delta_{12}$  для матрицы второго порядка



### СХЕМНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЯ БЛЭКА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ



[H. S. Black. – 1928]

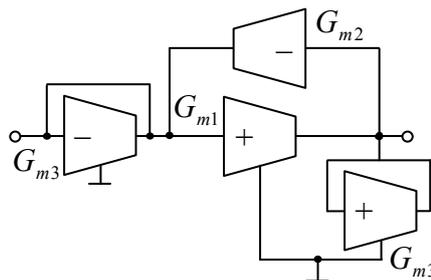
$$S = K / (1 + K\beta)$$

$$S = K / (1 + K\beta)$$

$$S = G_1 g_1 / (G_1 G_2 + g_1 g_2)$$

### РЕАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ БЛЭКА ТРАНСКОНДУКТИВНЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

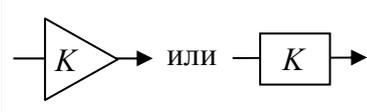
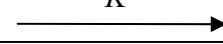
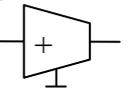
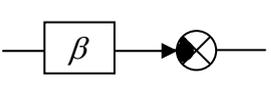
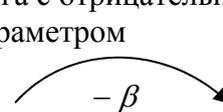
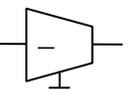
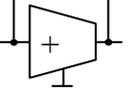
$$I_{\text{вых}} = G_m \Delta U_{\text{вх}}$$



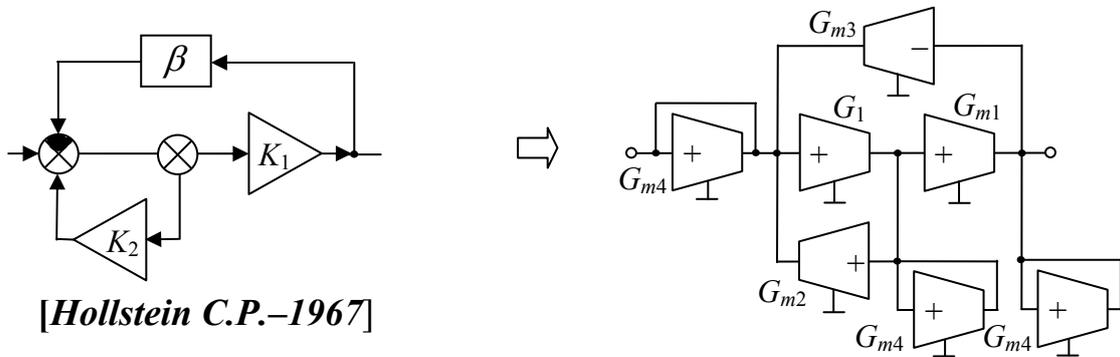
$$S = G_{m1} G_{m3} / (G_{m1} G_{m2} + G_{m3} G_{m3}), \text{ где } G_{m1} = K, G_{m2} = \beta, G_{m3} = 1$$

# ТРАНСКОНДУКТИВНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

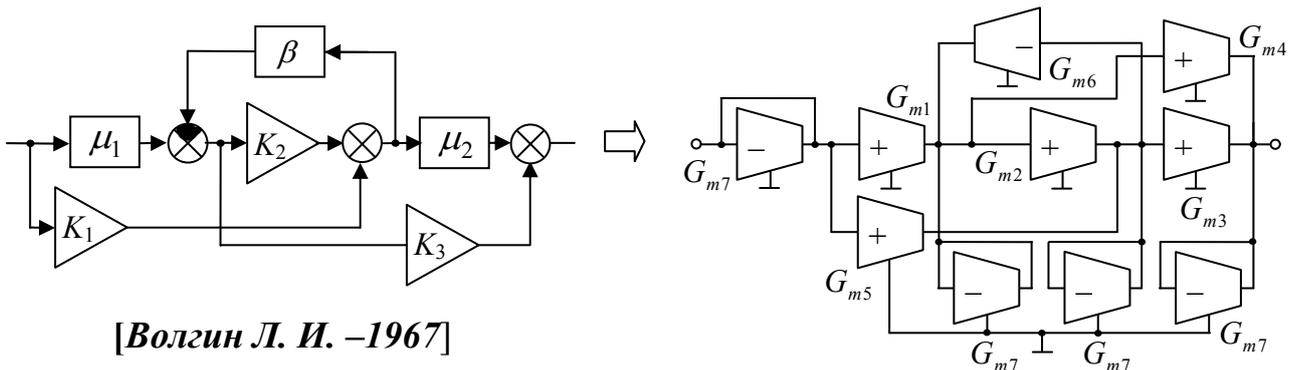
## ТРАНСКОНДУКТИВНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИГНАЛЬНОГО ГРАФА И СТРУКТУРНЫХ СХЕМ

Номер элемента	Элементы структурной Схемы	Элементы сигнального графа	Реализация на транскондуктивных усилителях
1		Дуга с положительным параметром $K$ 	Неинвертирующий усилитель 
2	Цепь обратной связи 	Дуга с отрицательным параметром $-\beta$ 	Инвертирующий усилитель 
3	Сумматор или узел 	Вершина 	Резистор 

### ТРАНСКОНДУКТИВНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УСИЛИТЕЛЯ С КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

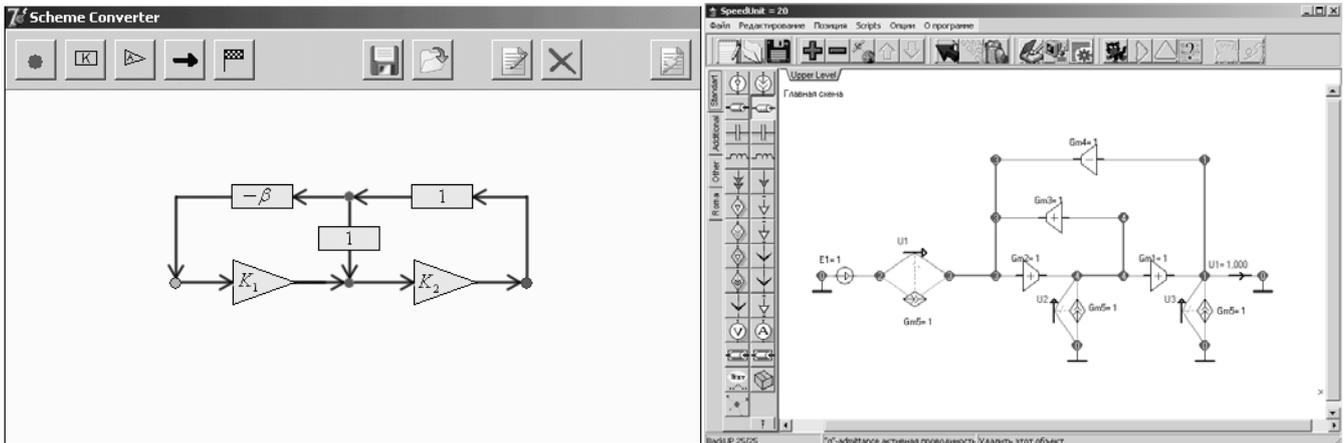


### ТРАНСКОНДУКТИВНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОМБИНАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ



# ПРОГРАММА ТРАНСКОНДУКТИВНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ SCHEMES CONVERTER

## ТРАНСКОНДУКТИВНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УСИЛИТЕЛЯ С КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

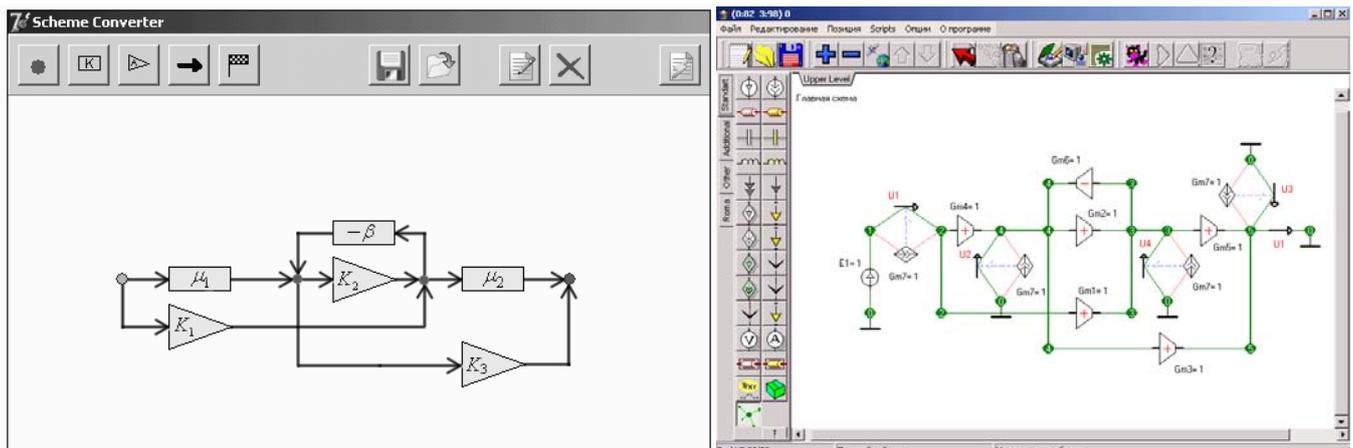


$$S = (K_1 K_2) / (1 + K_1 K_2 \beta - K_2)$$

$$U = \frac{G_{m1} G_{m2} G_{m4}}{G_2 G_{m1} G_{m2} G_{m3} - G_1 G_2 G_{m2} G_{m4} + G_{m4}},$$

где  $G_{m1} = K_1$ ,  $G_{m2} = K_2$ ,  $G_{m3} = \beta$ ,  
 $G_{m4} = g = 1$ ,  $G_1 = 1$ ,  $G_2 = 1$ .

## ТРАНСКОНДУКТИВНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОМБИНАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ



$$S = \frac{\mu_2 (K_1 + \mu_1 K_2) + (K_3 (\mu_1 - K_1 \beta))}{1 + K_2 \beta}$$

$$U = \frac{G_{m5} ((1 + G_{m2} G_{m4}) G_{m7}) + G_{m3} ((G_{m4} - G_{m6} G_{m1}) G_{m7})}{G_{m2} (G_{m6} G_{m7}) + G_{m7}}$$

где  $G_{m1} = K_1$ ,  $G_{m2} = K_2$ ,  $G_{m3} = K_3$ ,  $G_{m4} = \mu_1$ ,

$G_{m5} = \mu_2$ ,  $G_{m6} = \beta$ ,  $G_{m7} = g = 1$ .

# СХЕМНЫЙ ПОДХОД К ДОПУСКОВОМУ АНАЛИЗУ

## ДРОБНАЯ ФОРМА СИМВОЛЬНОЙ СХЕМНОЙ ФУНКЦИИ

$$S = S_0(1 + \gamma)$$

## МОДИФИЦИРОВАННАЯ ФОРМУЛА МИДДЛБРУКА

[R.D. Middlebrook.—1989]

$$S = S_0 \frac{\chi + Z_0^{(\chi)}}{\chi + Z^{(\chi)}}$$

$$S = S_0' \frac{1 + \chi Z_0'^{(\chi)}}{1 + \chi Z'^{(\chi)}}$$

$$Z_0^{(\chi)} = N_\chi / N_\chi, \quad Z'^{(\chi)} = D_\chi / D_\chi$$

$$Z_0^{(\chi)} = N_\chi / N_\chi, \quad Z^{(\chi)} = D_\chi / D_\chi$$

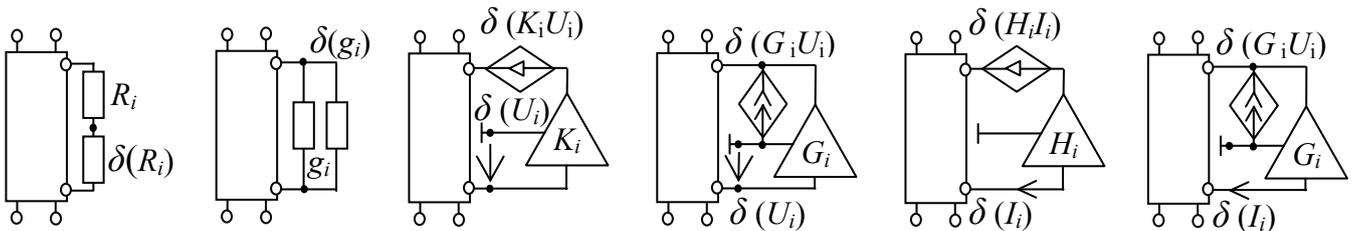
$N_\chi = \Delta (\chi \rightarrow \infty)$ ,  $D_\chi = \Delta (\chi \rightarrow \infty)$ ,  $N_\chi = \Delta (\chi \rightarrow 0)$ , и  $D_\chi = \Delta (\chi \rightarrow 0)$ ,  $\chi_i \in \{R, g, K, G, H, B\}$

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДРОБНЫХ ВЫРАЖЕНИЙ СХЕМНЫХ ФУНКЦИЙ ЧЕРЕЗ СХЕМНЫЕ ОПРЕДЕЛИТЕЛИ

$$S = \frac{N_\chi}{D_\chi} \left[ \left( \chi + \frac{N_\chi}{N_\chi} \right) / \left( \chi + \frac{D_\chi}{D_\chi} \right) \right]$$

$$S = \frac{N_\chi}{D_\chi} \left[ \left( 1 + \chi \frac{N_\chi}{N_\chi} \right) / \left( 1 + \chi \frac{D_\chi}{D_\chi} \right) \right]$$

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОПУСКОВ С ПОМОЩЬЮ СХЕМНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ



## ФОРМУЛА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ДОПУСКА $i$ -ГО ЭЛЕМЕНТА НА МУЛЬТИПЛИКАТИВНУЮ ПОГРЕШНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

$$\gamma_i = \frac{\delta(\chi_i)(N_{\delta(\chi_i)} D_{\delta(\chi_i)} - N_{\delta(\chi_i)} D_{\delta(\chi_i)})}{\delta(\chi_i) N_{\delta(\chi_i)} D_{\delta(\chi_i)} + N_{\delta(\chi_i)} D_{\delta(\chi_i)}}$$

## ФОРМУЛА ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ДОПУСКА $i$ -ГО ЭЛЕМЕНТА

$$\delta(\chi_i) = \frac{\gamma_i N_{\delta(\chi_i)} D_{\delta(\chi_i)}}{N_{\delta(\chi_i)} D_{\delta(\chi_i)} - N_{\delta(\chi_i)} D_{\delta(\chi_i)} (\gamma_i + 1)}$$

## ФОРМУЛА ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ВЛИЯНИЯ НА ПОГРЕШНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЦЕПИ ДОПУСКОВ $n$ ЧИСЛА ЭЛЕМЕНТОВ:

$$\gamma_{(1,2,\dots,n)} = \left[ \delta(\chi_1) \left( N_{\delta(\chi_1)} D_{\delta(\chi_1)} - N_{\delta(\chi_1)} D_{\delta(\chi_1)} \right) + \dots + \delta(\chi_n) \left( N_{\delta(\chi_n)} D_{\delta(\chi_n)} - N_{\delta(\chi_n)} D_{\delta(\chi_n)} \right) - N_{\delta(\chi_1,2,\dots,n)} D_{\delta(\chi_1,2,\dots,n)} \right] + \dots + \delta(\chi_1 \chi_2) \left( N_{\delta(\chi_1,2)} D_{\delta(\chi_1,2)} - N_{\delta(\chi_1,2)} D_{\delta(\chi_1,2)} \right) + \dots + \delta(\chi_1 \chi_2 \dots \chi_n) \left( N_{\delta(\chi_{(1,2,\dots,n)})} D_{\delta(\chi_{(1,2,\dots,n)})} - N_{\delta(\chi_{(1,2,\dots,n)})} D_{\delta(\chi_{(1,2,\dots,n)})} \right) \Bigg/ \left[ N_{\delta(\chi_{(1,2,\dots,n)})} \left( \delta(\chi_1) D_{\delta(\chi_1)} + \dots + \delta(\chi_n) D_{\delta(\chi_n)} \right) + \delta(\chi_1 \chi_2) D_{\delta(\chi_{(1,2)})} + \dots + \delta(\chi_1 \chi_2 \dots \chi_n) D_{\delta(\chi_{(1,2,\dots,n)})} + D_{\delta(\chi_{(1,2,\dots,n)})} \right]$$

# СХЕМНО-АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ДОПУСКОВ

**Формула определения допуска на сопротивление:**

$$\delta(R_i) = \frac{\gamma_{R_i} \left[ \begin{array}{c} R_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} R_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{c} R_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} R_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] - (\gamma_{R_i} + 1) \left[ \begin{array}{c} R_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} R_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right]}$$

**Формула определения допуска на проводимость:**

$$\delta(g_i) = \frac{\gamma_{g_i} \left[ \begin{array}{c} g_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} g_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{c} g_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} g_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] - (\gamma_{g_i} + 1) \left[ \begin{array}{c} g_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} g_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right]}$$

**Формула определения допуска на ИНУН**

$$\delta(K_i) = \frac{\gamma_{K_i} \left[ \begin{array}{c} K_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} K_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{c} K_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} K_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] - (\gamma_{K_i} + 1) \left[ \begin{array}{c} K_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} K_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right]}$$

**Формула определения допуска на ИТУН:**

$$\delta(G_i) = \frac{\gamma_{G_i} \left[ \begin{array}{c} G_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} G_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{c} G_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} G_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] - (\gamma_{G_i} + 1) \left[ \begin{array}{c} G_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} G_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right]}$$

**Формула определения допуска на ИНУТ:**

$$\delta(H_i) = \frac{\gamma_{H_i} \left[ \begin{array}{c} H_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} H_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{c} H_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} H_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] - (\gamma_{H_i} + 1) \left[ \begin{array}{c} H_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} H_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right]}$$

**Формула определения допуска на ИТУТ:**

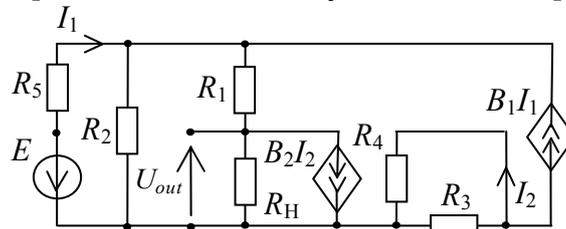
$$\delta(B_i) = \frac{\gamma_{B_i} \left[ \begin{array}{c} B_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} B_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{c} B_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} B_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] - (\gamma_{B_i} + 1) \left[ \begin{array}{c} B_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} B_i \\ \text{Circuit} \end{array} \right]}$$



# ДОПУСКОВЫЙ АНАЛИЗ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ

## СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ

[Лин Пен-Мин, Чуа Л. О.–1980]



## КОЭФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ N/D ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ

$$N_{\delta(\chi)} = R_6((R_3+R_4))(R_2(B_1+1))+(-B_2R_3)(-B_1(R_1+R_2))=101020200000000$$

$$D_{\delta(\chi)} = (R_3+R_4)(-B_1R_1R_2+R_1(R_2+R_5)+R_2R_5)+$$

$$+((R_3+R_4)R_6)(-B_1R_2+R_2+R_5)+(R_3R_6B_2)(R_2B_1) = 1244400000000$$

Соответственно,  $S_0=81,18$ .

## РАСЧЕТ ДОПУСКОВ ЭЛЕМЕНТОВ И ПОГРЕШНОСТЕЙ КОЭФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ

$\chi_i$	Символьные выражения определителей $N^{\delta(\chi)}$ и $D^{\delta(\chi)}$	$\gamma \%$		$\delta(\chi_i) \%$	
		$\delta(\chi_i) = +10\%$	$\delta(\chi_i) = -10\%$	$\gamma = +15\%$	$\gamma = -15\%$
$R_1$ 10 кОм	$N^{\delta(\chi)} = R_6B_2R_3B_1=100000000000$ $D^{\chi} = (B_1R_2+R_2+R_5)(R_3+R_4)= 22200000$	8	-8.3	19	-18
$R_2$ 0.1 кОм	$N^{\delta(\chi)} = R_6((R_3+R_4)(B_1+1))+(-B_2R_3)(-B_1)=$ 10202000000; $D^{\chi} = (R_3+R_4)(B_1R_1+R_1+R_5)+$ $((R_3+R_4)R_6)(B_1+1)+(-R_3R_6B_2)(-B_1)=12224000000$	-8.9	10.8	-13.4	18
$R_3$ 1 кОм	$N^{\chi} = R_6((R_2(B_1+1))+(-B_2)(-B_1(R_1+R_2)))=$ 101010000000; $D^{\chi} = (B_1R_1R_2+R_1(R_2+R_5)+R_2R_5)+$ $(R_6)(B_1R_2+R_2+R_5)+(-R_6B_2)(-R_2B_1)= 1122200000$	0.89	-1.1	-403	-64
$R_4$ 1 кОм	$N^{\chi} = R_6R_2(B_1+1)= 1000000000$ ; $D^{\chi} = B_1(R_1+R_6)R_2$ $+(R_1+R_6)(R_2+R_5)+ R_2R_5=122200000$	-0.97	0.99	-133	180
$R_5$ 1кОм	$N^{\chi} = 0$ ; $D^{\chi} = (R_1+R_2+R_6)((R_3+R_4)) = 22200000$	-0.17	0.17	-731	989
$R_6$ 1кОм	$N^{\chi} = (R_3+R_4)(R_2(B_1+1))+(-B_2R_3)(-B_1(R_1+R_2))=$ 101020200000; $D^{\chi} = (R_3+R_4)(B_1R_2+R_2+R_5)+$ $(-B_2R_3)(-R_2B_1)= 1022200000$	1.7	-1.9	271	-49.7
$B_1$ 121 См	$N^{\chi} = R_6(B_2R_3(R_1+R_2)+R_2(R_3+R_4))=1010200000000$ $D^{\chi} = R_2(R_6B_2R_3+(R_1+R_6)(R_3+R_4))= 12200000000$	0.17	-0.21	-117	-90
$B_2$ 121 См	$N^{\chi} = R_6R_3B_1(R_1+R_2)=10100000000000$ $D^{\chi} = R_6R_2B_1R_3= 10000000000$	1.8	-2.1	198	-47

# КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ДОПУСКОВОГО АНАЛИЗА TOLERALIZE

## ПОЛУЧЕНИЕ СИМВОЛЬНЫХ ВЫРАЖЕНИЙ ДОПУСКОВ НА ЭЛЕМЕНТЫ И ПОГРЕШНОСТЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

**Список элементов цепи:**

Элемент	Узел1	Узел2	Узел3	Узел4	Параметр
F1	2	1	3	4	100
F2	5	0	2	6	100
E1	3	0			1
R1	1	5			10000
R2	0	1			100
R3	0	2			1000
R4	0	6			1000
R5	4	1			1000
R6	0	5			1000
U1	0	5			

**Выходные данные:**

Z1:  $R6 \cdot F2 \cdot R3 \cdot F1$

Z2:  $R2 \cdot R6 \cdot (R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1) + R4 \cdot ((F1+1)))$

Z3:  $R2 \cdot (R3 \cdot ((F1+1)) + R4 \cdot ((F1+1))) + R5 \cdot (R3+R4)$

Z4:  $R2 \cdot (R6 \cdot (R4 \cdot ((F1+1)) + R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1)) + R5 \cdot (R3+R4)) + R6 \cdot R5 \cdot (R3+R4)$

**Полученные формулы:**

Дробная ССФ 1: 
$$S = \frac{R6 \cdot F2 \cdot R3 \cdot F1 / (R2 \cdot (R3 \cdot ((F1+1)) + R4 \cdot ((F1+1))) + R5 \cdot (R3+R4)) \cdot (R1 + R2 \cdot R6 \cdot (R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1) + R4 \cdot ((F1+1))) / (R6 \cdot F2 \cdot R3 \cdot F1))}{(R1 + R2 \cdot (R6 \cdot (R4 \cdot ((F1+1)) + R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1)) + R5 \cdot (R3+R4)) + R6 \cdot R5 \cdot (R3+R4) / (R2 \cdot (R3 \cdot ((F1+1)) + R4 \cdot ((F1+1))) + R5 \cdot (R3+R4))}$$

Дробная ССФ 2: 
$$S = \frac{R2 \cdot R6 \cdot (R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1) + R4 \cdot ((F1+1))) / (R2 \cdot (R6 \cdot (R4 \cdot ((F1+1)) + R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1)) + R5 \cdot (R3+R4)) + R6 \cdot R5 \cdot (R3+R4) \cdot (1 + R1 \cdot R6 \cdot F2 \cdot R3 \cdot F1 / (R2 \cdot R6 \cdot (R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1) + R4 \cdot ((F1+1))))}{(1 + R1 \cdot R2 \cdot (R3 \cdot ((F1+1)) + R4 \cdot ((F1+1))) + R5 \cdot (R3+R4) / (R2 \cdot (R6 \cdot (R4 \cdot ((F1+1)) + R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1)) + R5 \cdot (R3+R4)) + R6 \cdot R5 \cdot (R3+R4)}$$

Мультипликативная погрешность: 
$$Y = \frac{R1 \cdot (R6 \cdot F2 \cdot R3 \cdot F1 \cdot R2 \cdot (R6 \cdot (R4 \cdot ((F1+1)) + R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1)) + R5 \cdot (R3+R4)) + R6 \cdot R5 \cdot (R3+R4) \cdot R2 \cdot R6 \cdot (R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1) + R4 \cdot ((F1+1))) \cdot R2 \cdot (R3 \cdot ((F1+1)) + R4 \cdot ((F1+1))) + R5 \cdot (R3+R4)}{(R1 \cdot R2 \cdot R6 \cdot (R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1) + R4 \cdot ((F1+1))) \cdot R2 \cdot (R3 \cdot ((F1+1)) + R4 \cdot ((F1+1))) + R5 \cdot (R3+R4) + R2 \cdot R6 \cdot (R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1) + R4 \cdot ((F1+1))) \cdot R2 \cdot (R6 \cdot (R4 \cdot ((F1+1)) + R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1)) + R5 \cdot (R3+R4)) + R6 \cdot R5 \cdot (R3+R4)}$$

Допуск: 
$$X_i = \frac{R1 \cdot (R6 \cdot F2 \cdot R3 \cdot F1 \cdot R2 \cdot (R6 \cdot (R4 \cdot ((F1+1)) + R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1)) + R5 \cdot (R3+R4)) + R6 \cdot R5 \cdot (R3+R4) \cdot R2 \cdot R6 \cdot (R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1) + R4 \cdot ((F1+1))) \cdot R2 \cdot (R3 \cdot ((F1+1)) + R4 \cdot ((F1+1))) + R5 \cdot (R3+R4)}{(R1 \cdot R2 \cdot R6 \cdot (R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1) + R4 \cdot ((F1+1))) \cdot R2 \cdot (R3 \cdot ((F1+1)) + R4 \cdot ((F1+1))) + R5 \cdot (R3+R4) + R2 \cdot R6 \cdot (R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1) + R4 \cdot ((F1+1))) \cdot R2 \cdot (R6 \cdot (R4 \cdot ((F1+1)) + R3 \cdot F1 \cdot ((F2+1)+1)) + R5 \cdot (R3+R4)) + R6 \cdot R5 \cdot (R3+R4)}$$

## РАСЧЕТ ЧИСЛЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ ASP

**Ввод**

f=1000.000000;  
p=2\*3.14159265358979323\*f;  
% Values:  
B1=100;  
B2=100;  
E1=1;  
R1=10000;  
R2=100;  
R3=1000;  
R4=1000;  
R5=1000;  
R6=1000;

**Результат**

B1=100;  
B2=100;  
E1=1;  
R1=10000;  
R2=100;  
R3=1000;  
R4=1000;  
R5=1000;  
R6=1000;  
U1=81.1798457087753;

# **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

**1. Разработаны и реализованы в компьютерных программах прямые методики структурного синтеза линейных электрических цепей по символьной схемной функции и полиномиальной схемной функции.**

**2. Предложена и реализована в компьютерной программе прямая методика синтеза произвольных структурных схем электрических цепей на основе транскондуктивных усилителей.**

**3. Разработана и реализована в компьютерной программе методика формирования символьных выражений для определения мультипликативной погрешности функции преобразования и технологического разброса параметров элементов линейных электрических цепей, наиболее удобных по форме представления для многовариантного моделирования, аналитических исследований и точных вычислений.**