

Ульяновский государственный технический университет

С. А. КУРГАНОВ

**ПЛАКАТЫ К ДОКЛАДУ**  
**по докторской диссертации**

СИМВОЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ДИАКОПТИКА  
ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

КОПИИ

Ульяновск 2006

## НАИМЕНОВАНИЕ ПЛАКАТОВ

	с.
1. Актуальность темы .....	3
2. Цель диссертационной работы и основные задачи.....	4
3. Защищаемые положения .....	5
4. Обозначение аномальных элементов в теории цепей.....	6
5. Основы теории схемных определителей.....	7
6. Метод схемно-алгебраической редукции.....	8
7. Топологические условия существования передаточных параметров ....	9
8. Эффективность метода схемно-алгебраической редукции .....	10
9. Анализ электрической системы методом схемно-алгебраической редукции.....	11
10. Анализ электрической системы (продолжение).....	12
11. Анализ контурных сетей методом схемно-алгебраической редукции...	13
12. Операционный усилитель $\mu A$ 741. Схема замещения.....	14
13. Избирательный усилитель.....	15
14. Метод выделения параметров в базисе зарядов и напряжений .....	16
15. Схемно-алгебраические формулы для дискретно-аналоговых схем ...	17
16. Анализ цепи с переключаемыми конденсаторами в z-области.....	18
17. Схема замещения биквада Лайкера-Флешера в z-области.....	19
18. Неявный метод наложения воздействий (НМН).....	20
19. НМН на основе формул выделения независимых источников .....	21
20. Эффективность неявного метода наложения.....	22
21. НМН в диакопике электрических цепей.....	23
22. Анализ по неявному методу наложения электрической модели коррозии.....	24
23. НМН для анализа цепей в симметричных координатах.....	25
24. НМН для анализа цепей в симметричных координатах (продолжение).	26
25. Метод выделения параметров многополюсников .....	27
26. Безызбыточность анализа по методу выделения многополюсников.....	28
27. Неравновесные схемные миноры.....	29
28. Метод неравновесных схемных миноров.....	30
29. Эффективность метода неравновесных схемных миноров.....	31
30. Метод косвенной компенсации элементов для топологической диагностики.....	32
31. Топологические условия диагностируемости цепей .....	33
32. Параметрические границы диагностируемости цепи.....	34
33. Компьютерная система анализа и диагностики цепей SCAD.....	35
34. Характеристики функций кварцевого фильтра.....	36
35. Точность численных расчетов фильтра.....	37
36. Анализ устойчивости электрических цепей .....	38
37. Формулы для относительной чувствительности.....	39
38. Внедрение результатов диссертационной работы.....	40

1.

# **АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ**

Одним из приоритетов Энергетической стратегии России на период до 2020 года (Распоряжение Правительства № 1234-р от 28.08.2003г.) является «полное и надёжное обеспечение населения и экономики страны энергоресурсами... и недопущение развития кризисных ситуаций». В электроснабжении такие ситуации имеют большую вероятность из-за износа активной части фондов электроэнергетики на 60...75 %. В связи с этим возникает проблема мониторинга электроэнергетических сетей – диагностики состояния элементов в реальном масштабе времени. Требуемое для этого высокое быстродействие могут обеспечить компилированные символьные формулы, которые решают задачи анализа и диагностики в десятки-сотни раз быстрее, чем матрично-численные алгоритмы.

Однако современные математические программы общего назначения (Maple, Mathematika) не могут решить символьные системы, содержащие более 10...15 уравнений. Специализированные программы (STAINS, ISAAC) не позволяют анализировать сложные цепи, разделяемые на подсхемы более чем по 3...5-ти узлам. В то же время трехфазные системы могут быть разделены на подсхемы только по 6...10-ти узлам. Поэтому поставленная в диссертации научная задача символьного анализа и диагностики сложных электрических цепей с сильно связанными подсхемами является актуальной задачей.

## 2. **ЦЕЛЬ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ –**

**разработка символьных методов анализа и диагностики сложных (десятки-сотни элементов и узлов) линейных электрических цепей с сильносвязанными (по 6...10-ти узлам) подсхемами, в том числе электрических систем и параметрических схем – дискретно-аналоговых цепей с переключаемыми конденсаторами.**

### **ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ:**

**(НЕ РЕШЕНЫ НИ У НАС В РОССИИ, НИ ЗА РУБЕЖОМ)**

- задача символьного анализа линейных электрических цепей с сильно связанными подсхемами;**
- задача символьного анализа сложных дискретно-аналоговых схем с переключаемыми конденсаторами;**
- задача символьной диагностики сложных линейных электрических цепей.**

### **3. ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

1. Метод схемно-алгебраической редукции, сокращающий (по сравнению с известными методами) в десятки-сотни раз число слагаемых в диакоптических формулах и приблизительно во столько же раз время анализа цепей с сильно связанными подсхемами.

2. Метод выделения параметров в базисе зарядов и напряжений, позволяющий сформировать для дискретно-аналоговых схем с переключаемыми конденсаторами символьные выражения, не содержащие избыточных (нулевых и сокращающихся) слагаемых.

3. Неявный метод наложения источников воздействия для топологического анализа, диакоптики и диагностики электрических цепей, позволяющий представить искомый отклик или параметр в виде отношения двух схемных определителей в отличие от традиционного метода наложения, требующего множества определителей. Метод позволяет получить свернутые символьные выражения и сократить время анализа в число раз, равное приблизительно отношению числа независимых источников к числу автономных подсхем.

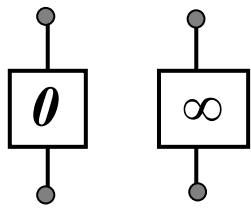
4. Схемно-алгебраический метод выделения параметров типовых многополюсников (взаимоиндуктивностей, транзисторов, и др.), позволяющий сократить число схемных миноров приблизительно в 2,5 раза и во столько же раз уменьшить время анализа.

5. Диакоптический метод неравновесных схемных миноров, обеспечивающий половинное сечение и уменьшающий время анализа в 1,7...4,8 раза.

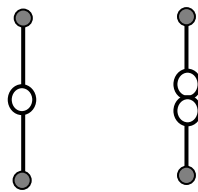
6. Метод косвенной и смешанной компенсации элементов с неизвестными параметрами для топологического решения линейной задачи символьной диагностики электрических цепей.

# 4. ОБОЗНАЧЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ

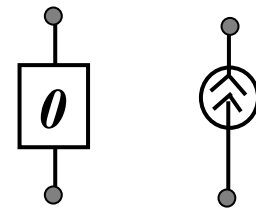
## ИДЕАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ТЕЛЛЕГЕНА (1954) – НЕНАПРАВЛЕННЫЙ НУЛЛОР



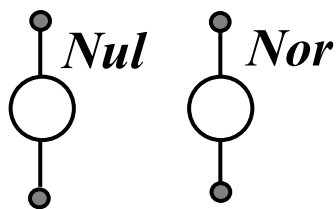
*Г.Карлин,  
Д.Йола.– 1961*



*Я.Браун.–  
1964*



*В.П.Сигорский,  
А.И.Петренко.–  
1976*



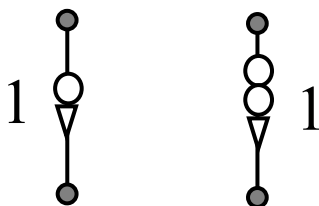
*Г.Гилен, Г.Вальшарт,  
В.Сансен.–1989*



*М.А.Шакиров .–  
2006*

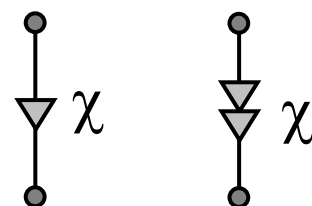
## НАПРАВЛЕННЫЙ НУЛЛОР

нумерованный



*Я.Браун.–1966*

взвешенный



*В.В.Филаретов.–  
2001*

# 5. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СХЕМНЫХ ОПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ

## ФОРМУЛЫ ВЫДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ПРОВОДИМОСТИ

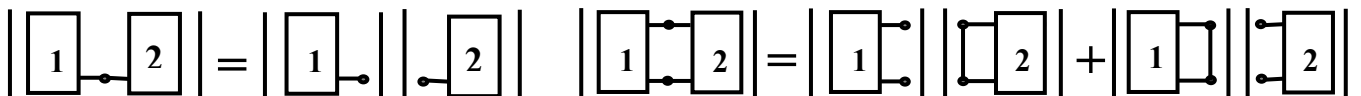
[В.Фойснер.–1902]

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

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

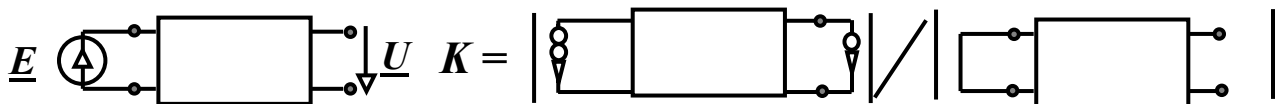
## ФОРМУЛЫ ДЕЛЕНИЯ СХЕМ ПО ОДНОМУ И ДВУМ УЗЛАМ

[В.Фойснер.–1904]



## ФОРМУЛЫ ДЛЯ ВХОДНЫХ И ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ

[Я.Браун.–1966]



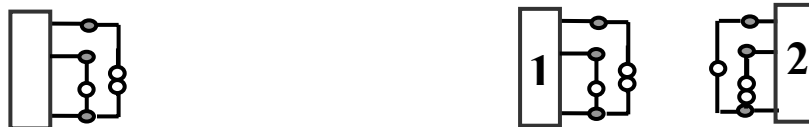
## ФОРМУЛЫ ВЫДЕЛЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ (УИ)

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

[Р.Хашемин.–1977]

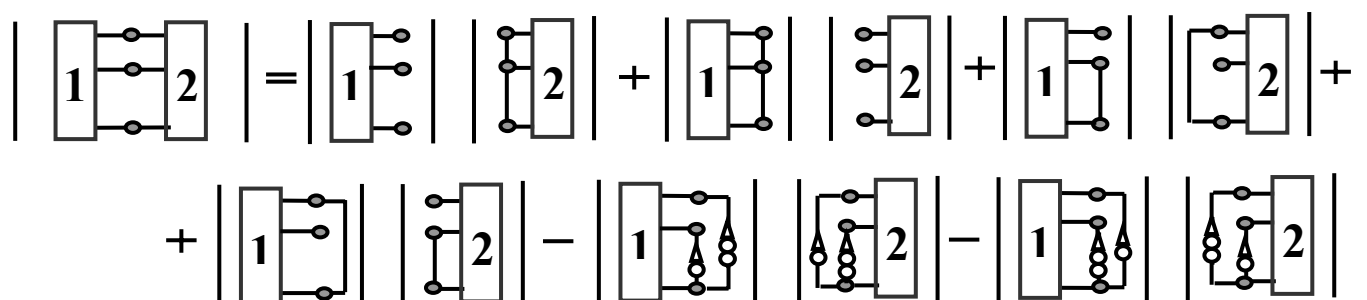
[В.В.Филаретов.–1996,1998]

## ПОСТРОЕНИЕ МАТРИЧНЫХ МИНОРОВ ДЛЯ СХЕМЫ [А.В.Бондаренко.–1977] И ПОДСХЕМЫ [С.М. Чанг, Г.М.Визба.–1994]



## ФОРМУЛА БИСЕКЦИИ СХЕМЫ ПО $n$ УЗЛАМ НА ПОДСХЕМЫ, НЕСВЯЗАННЫЕ УПРАВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

(МЕТОД ДВОИЧНЫХ ВЕКТОРОВ – МДВ) [В.В.Филаретов.–2001]



6.

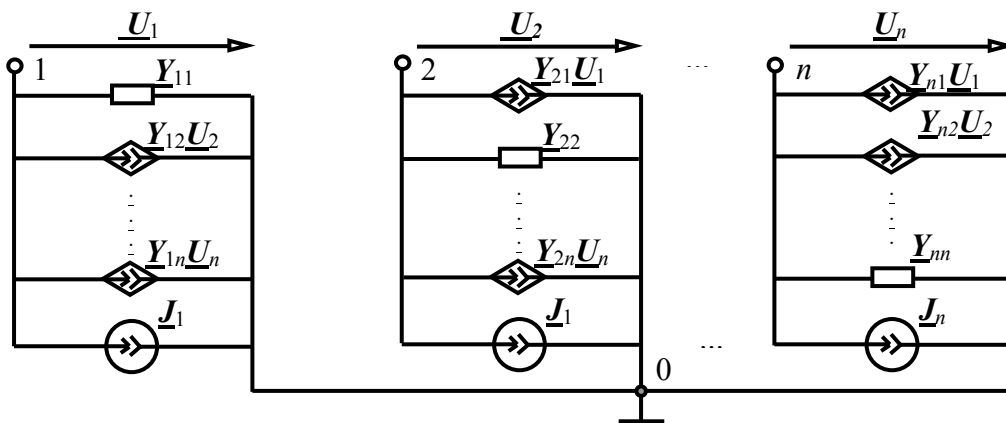
# МЕТОД СХЕМНО-АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ РЕДУКЦИИ

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИМВОЛЬНОГО АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ С СИЛЬНОСВЯЗАННЫМИ ПОДСХЕМАМИ

ЧИСЛО СХЕМНЫХ МИНОРОВ И ПЕРЕДАТОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ НЕАВТОНОМНЫХ ПОДСХЕМ

Число полюсов	3	4	5	6	7	8	9	10
Число миноров	6	20	70	252	924	3432	12870	48620
Число передаточных параметров	9	16	25	36	49	64	81	100

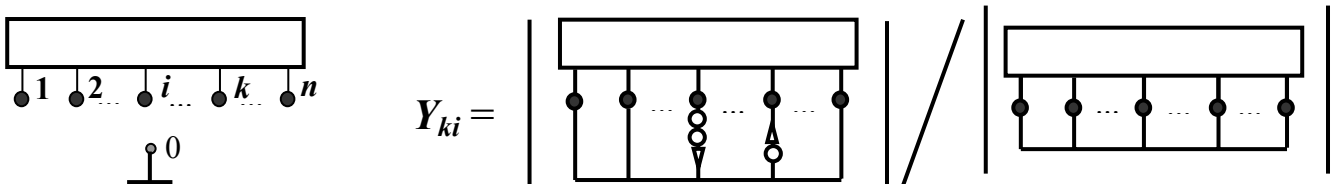
МНОГОМЕРНЫЙ ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ ГЕНЕРАТОР [М.А.Шакиров .-1980]



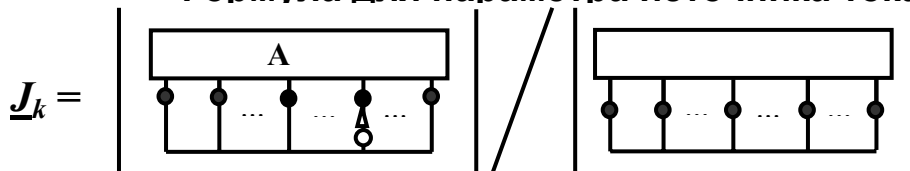
## СХЕМНО-АЛГЕБРАИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДСХЕМЫ

Исходная подсхема

Формула для передаточной проводимости



Формула для параметра источника тока

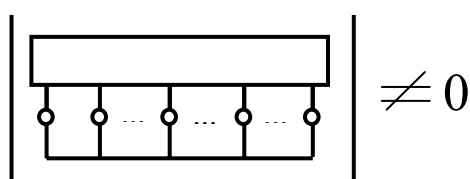




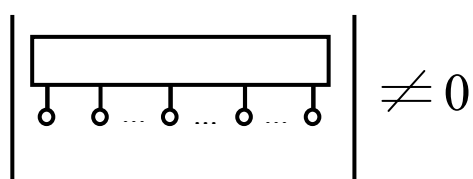
# 7. ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ (МНОГОМЕРНОГО ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА)

## ДОСТАТОЧНОЕ УСЛОВИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ

**Y- ПАРАМЕТРОВ**



**Z- ПАРАМЕТРОВ**



## НЕОБХОДИМЫЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

ДЛЯ Y-ПАРАМЕТРОВ СТОРОНЫ ПОДСХЕМЫ НЕ ДОЛЖНЫ СОДЕРЖАТЬ СЛЕДУЮЩИЕ ФРАГМЕНТЫ:

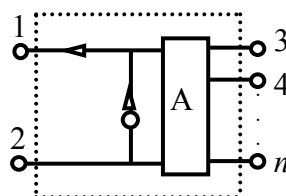
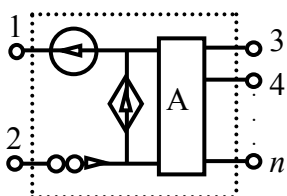


Рис. 1

ДЛЯ Z-ПАРАМЕТРОВ ПОЛЮСЫ НЕ ДОЛЖНЫ СОДЕРЖАТЬ:

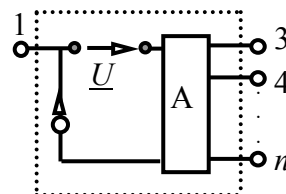
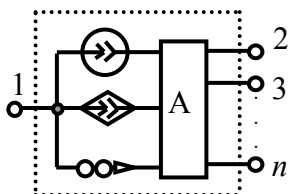


Рис. 2

## ДЛЯ ГИБРИДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

*U*-СТОРОНЫ НЕ ДОЛЖНЫ СОДЕРЖАТЬ ФРАГМЕНТОВ НА РИС. 1, А *I*-ПОЛЮСЫ – ФРАГМЕНТОВ НА РИС. 2.

# 8. ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДА СХЕМНО-АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ РЕДУКЦИИ

СРАВНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА СХЕМНО-АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ РЕДУКЦИИ И МДВ [В.В.Филаретов.–2002] НА СХЕМАХ ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА (ПФ) [J.A.Starzyk, A.Konczykowska–1986], ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ (ОУ)  $\mu\text{A}$  741, ИЗБИРАТЕЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ (ИУ) [Э.А.ЛАКСБЕРГ–1973] И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (ЭС) [М.А.ШАКИРОВ.–2003]

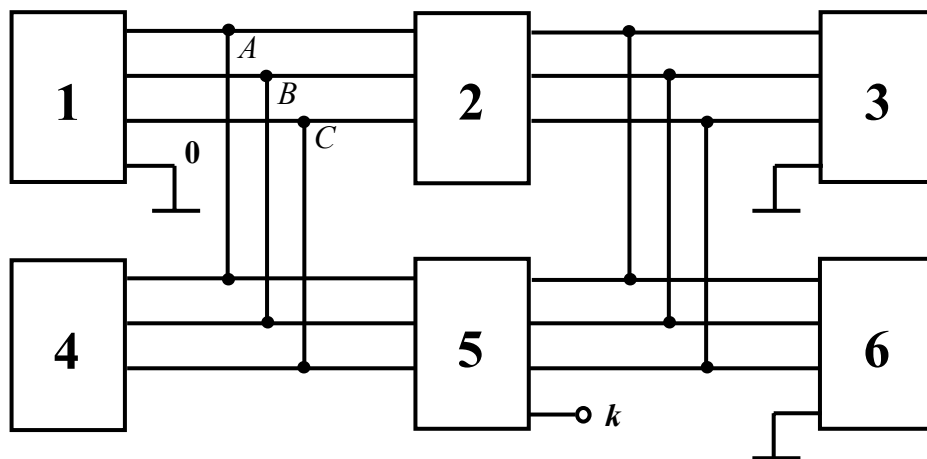
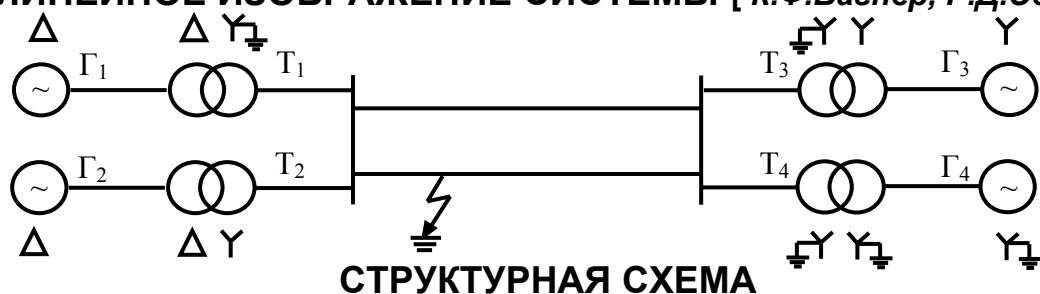
Схе- ма	Сложность схемы			Метод двоичных векторов <u>МДВ+НМН</u>				Метод схемно-алгебраической редукции			
	ДП	УИ +НИ	Связ- ность под- схем	*	+	=	t	*	+	=	t
				/	-			/	-		
ПФ	44	13+1	3...4	266 1	156 97	116	23 с	79 26	34 26	85	21 с
ОУ	191	26+1	3...4	1882 116	2240 98	642	20 с	1329 620	1417 138	808	12 с
ИУ	84	9+1	3...5	3327 36	2363 558	647	28 с	1326 264	1022 257	341	11 с
ЭС	32	54+12	6...9	<u>110324</u> 4	<u>62664</u> <u>42645</u>	<u>22118</u>	<u>2</u> ч	13984 1033	9086 2721	1197	54 с

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА СХЕМНО-АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ РЕДУКЦИИ (МСАР) И МДВ [В.В.Филаретов.–2002] НА КОНТУРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ [Г.Крон.–1978]

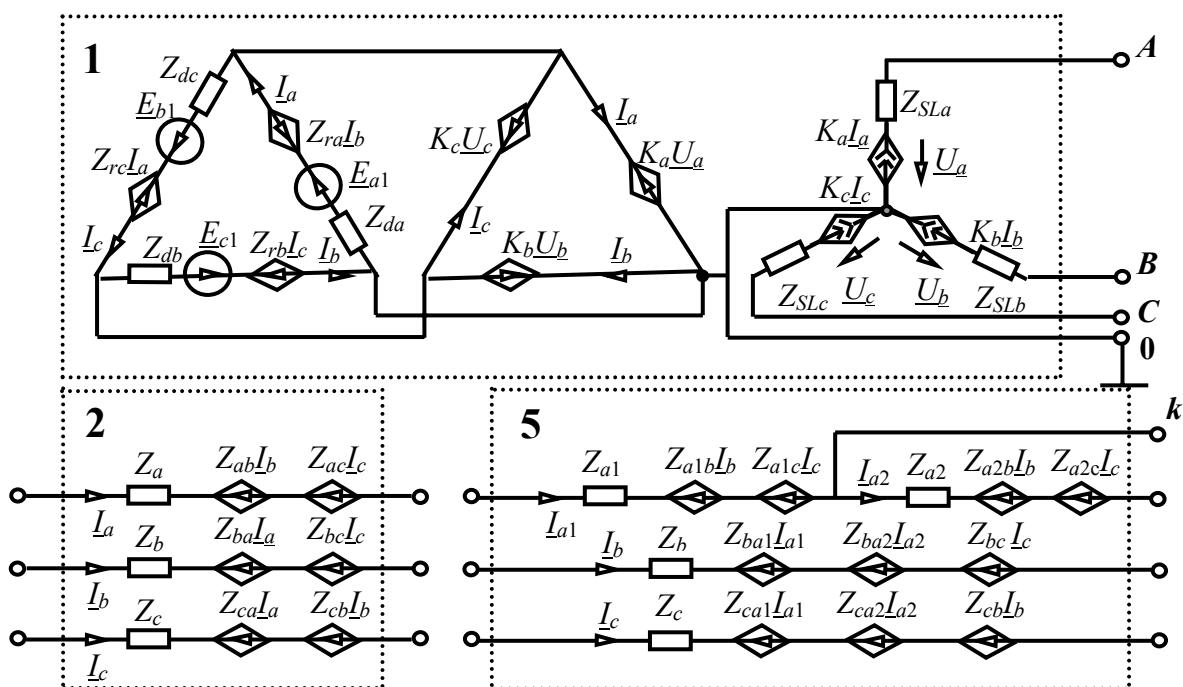
№сети		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Число узлов		16	25	36	49	64	81	100	121	144	200
Число ветвей		24	40	60	84	112	144	180	220	264	370
Число контуров		9	16	25	36	49	64	81	100	121	171
Максимальное число полюсов у подсхем		5	6	7	8	9	10	11	12	13	11
Число умножений в напряжениях и токах	МСАР	193	1.9· 10 <sup>3</sup>	1.2· 10 <sup>4</sup>	3.4· 10 <sup>4</sup>	1.4· 10 <sup>5</sup>	4.9· 10 <sup>5</sup>	8.7· 10 <sup>5</sup>	2.7· 10 <sup>6</sup>	4.8· 10 <sup>6</sup>	8.8· 10 <sup>5</sup>
	МДВ	1042	2.1· 10 <sup>4</sup>	2.7· 10 <sup>5</sup>	Формулы не получены из-за больших затрат времени						

# 9. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ СХЕМНО-АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ РЕДУКЦИИ

ОДНОЛИНЕЙНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ СИСТЕМЫ [ К.Ф.Вагнер, Р.Д.Эванс.–1936]

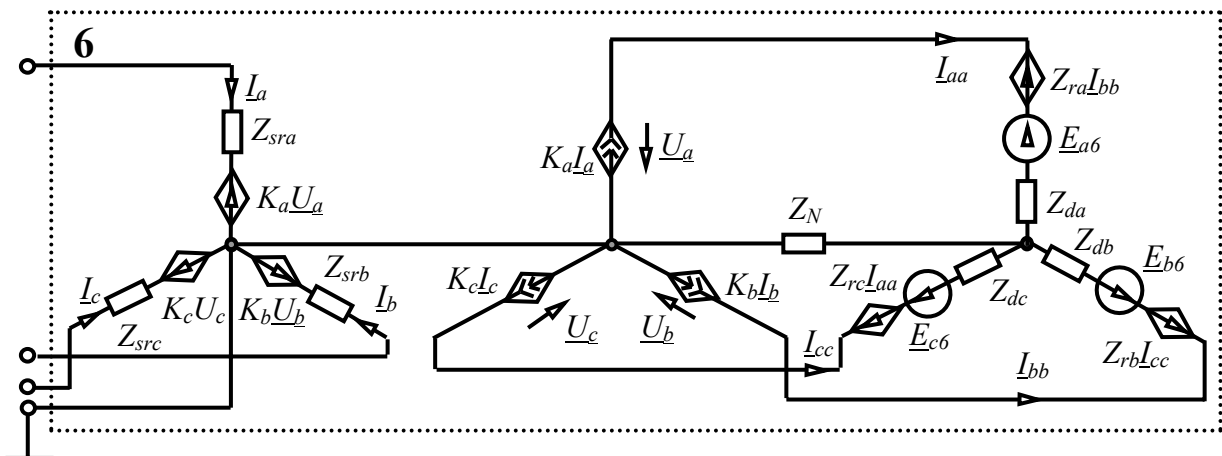
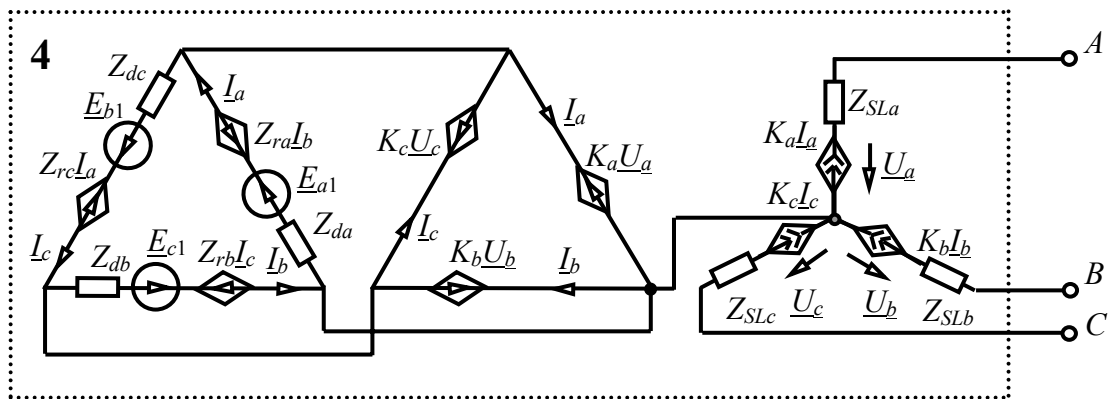
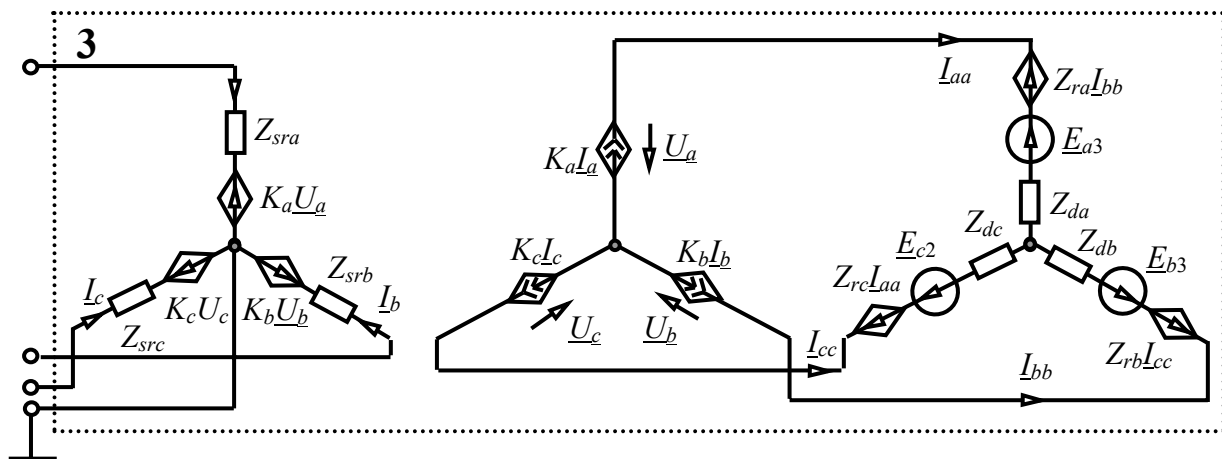


**СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ БЛОКОВ 1, 2, 5 [М.А.Шакиров.–2003]**



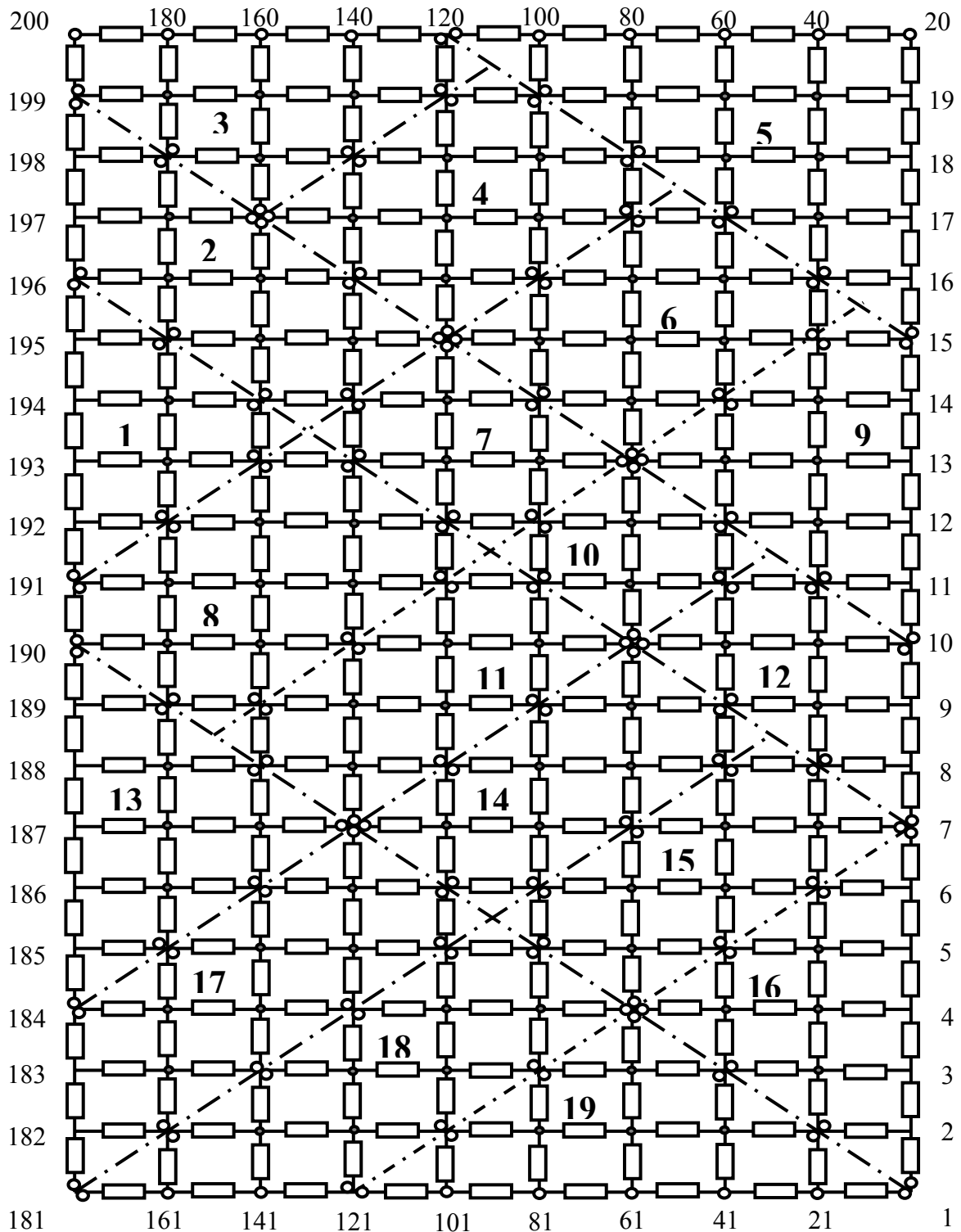
# 10. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ БЛОКОВ 3, 4, 6 [М.А.Шакиров.-2003]



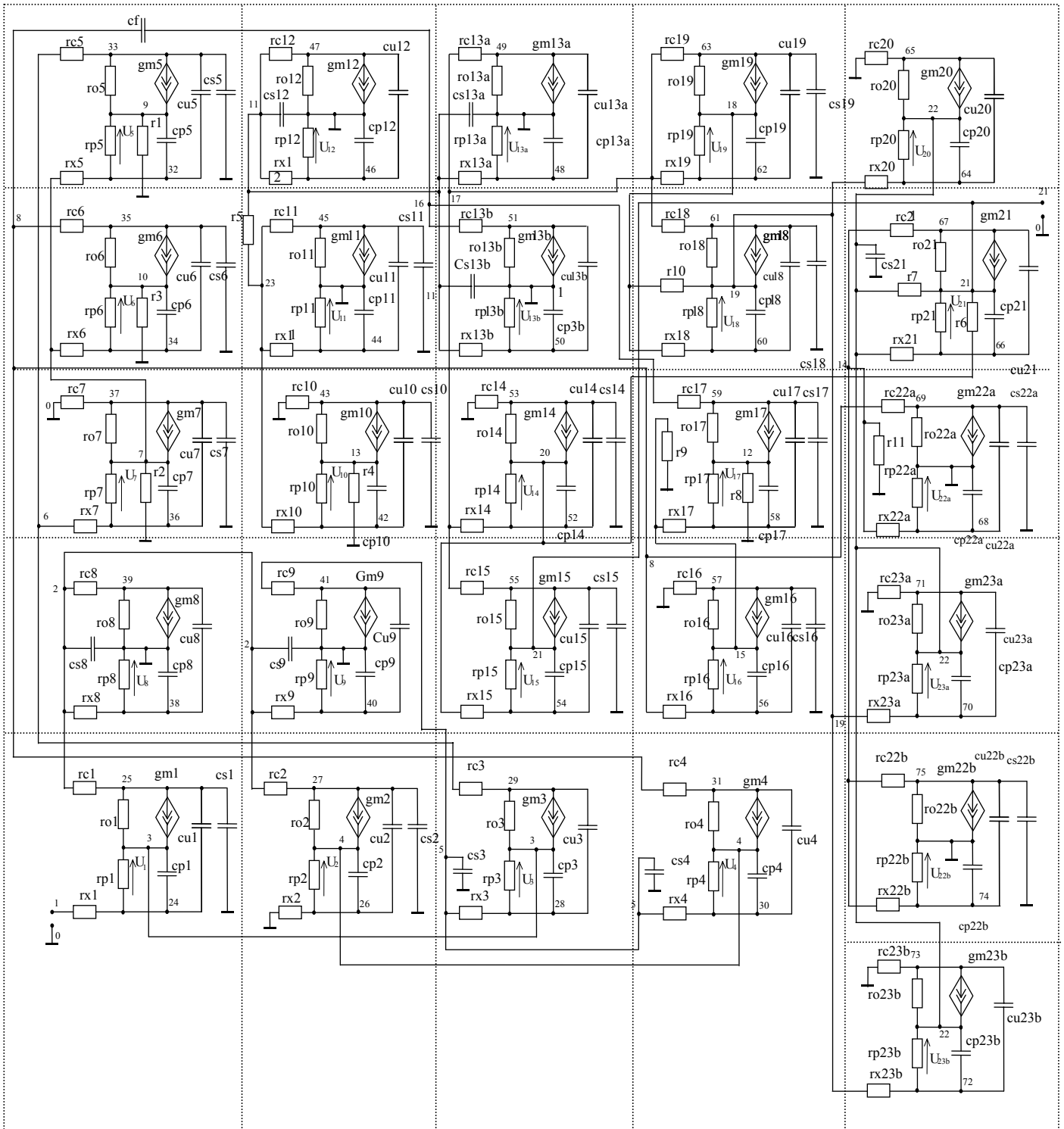
# 11. АНАЛИЗ КОНТУРНЫХ СЕТЕЙ МЕТОДОМ СХЕМНО- АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ РЕДУКЦИИ

**КОНТУРНАЯ СЕТЬ** [ Г.Крон.–1978; Ш.Н.Хусаинов.– 1998]



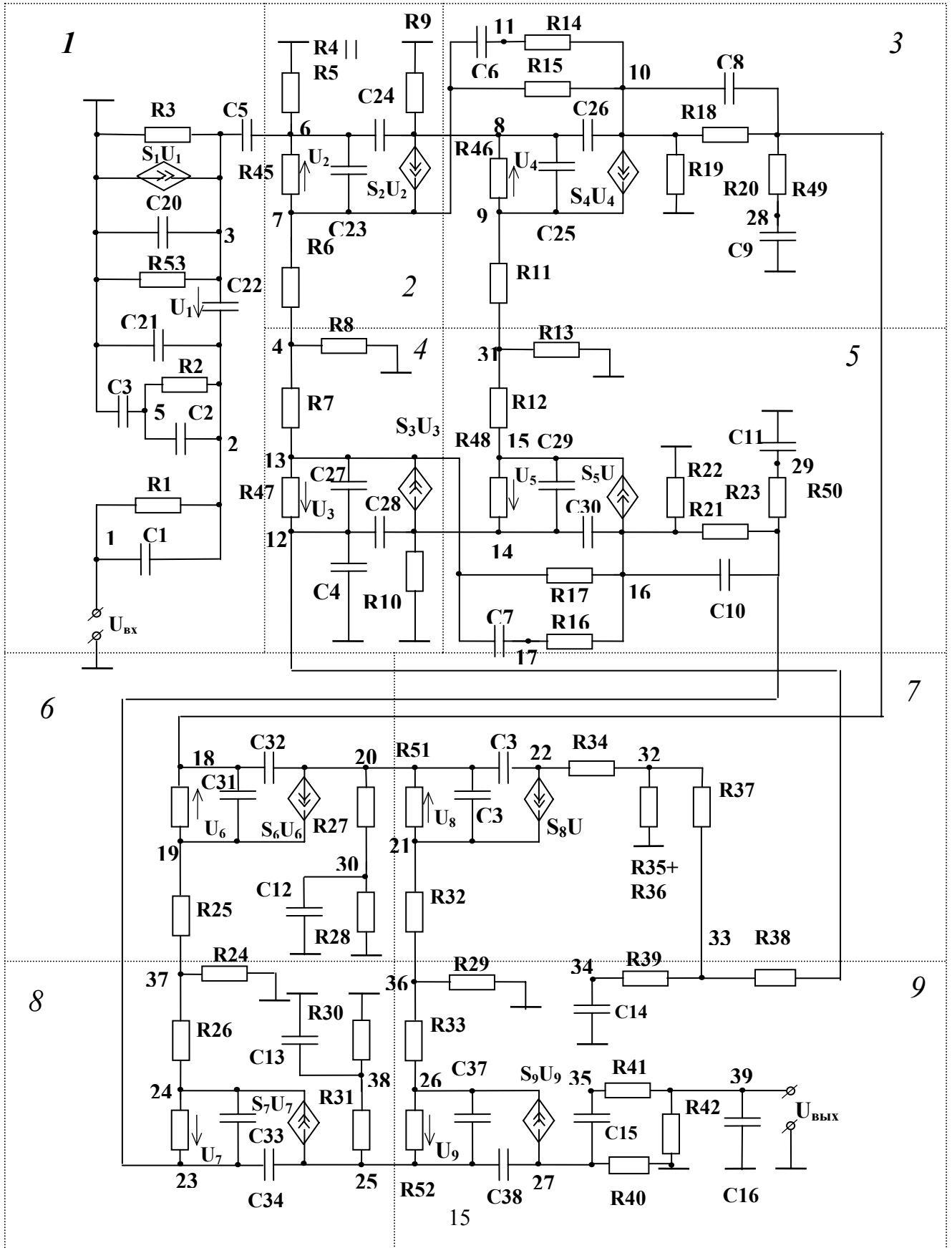
# 12. ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ $\mu A741$ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ

[Б.Роданский.– 2000]



# 13. ИЗБИРАТЕЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ [Э.А.ЛАКСБЕРГ.-1973]



# 14. МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ В БАЗИСЕ ЗАРЯДОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИМВОЛЬНОГО АНАЛИЗА ДИСКРЕТНО-АНАЛОГОВЫХ ЦЕПЕЙ С ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫМИ КОНДЕНСАТОРАМИ

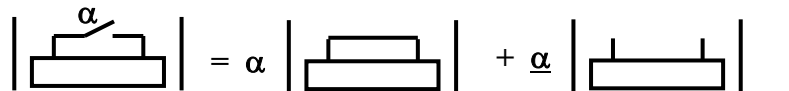
ФОРМУЛЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ЕМКОСТИ И ЭЛАСТАНСА

$$\Delta = C\Delta_C + \Delta^C; \quad \Delta = S\Delta^S + \Delta_S$$

ВЫДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ЗАРЯДА И НАПРЯЖЕНИЯ, УПРАВЛЯЕМЫХ ЗАРЯДОМ И НАПРЯЖЕНИЕМ

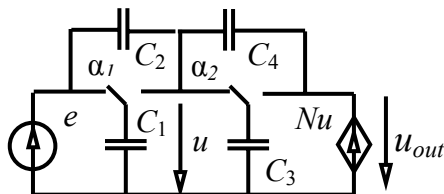
$$\Delta = \chi \Delta(\chi \Rightarrow \text{НУИ}) + \Delta(\chi=0).$$

ВЫДЕЛЕНИЕ ИДЕАЛЬНОГО КЛЮЧА

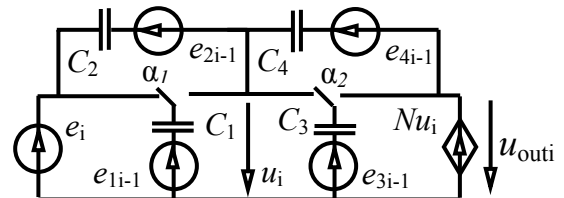


АНАЛИЗ ЦЕПИ С ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫМИ КОНДЕНСАТОРАМИ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

ИСХОДНАЯ СХЕМА [В.Г.Миронов.-2003]



ДИСКРЕТНАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ



ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПО МЕТОДУ ВЫДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ В БАЗИСЕ ЗАРЯДОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

$$u_{outi} = \frac{N(C_2(e_i - e_{2i-1}) + C_1\alpha_1 e_{1i-1} + \alpha_2 C_3 e_{3i-1} + C_4 e_{4i-1})}{\alpha_1 C_1 + C_2 + \alpha_2 C_3 + C_4 - NC_4}. \quad (1)$$

ФОРМУЛА ПО МЕТОДУ РАСШИРЕННОГО УЗЛОВОГО БАЗИСА (МРУБ) [В.Г.Миронов.-2003], ПОЛУЧЕННАЯ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ MAPLE

$$u_{out} = N(-C_1(-e_{1i-1} + e_i \alpha_1) \alpha_1 + (-e_{2i-1} + e_i) C_2 + C_4 e_{4i-1} + C_3 e_{3i-1} \alpha_2) / ((-a_2 \alpha_2 N + a_2^2) C_3 + (1-N) C_4 + C_2 + \alpha_1^2 C_1)$$

В формуле по методу выделения параметров в базисе зарядов и напряжений отсутствуют избыточные нулевые ( $\alpha_1 \alpha_1$  и  $a_2 \alpha_2$ ) слагаемые.



15.

# СХЕМНО-АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ДИСКРЕТНО- АНАЛОГОВЫХ СХЕМ В Z-ОБЛАСТИ

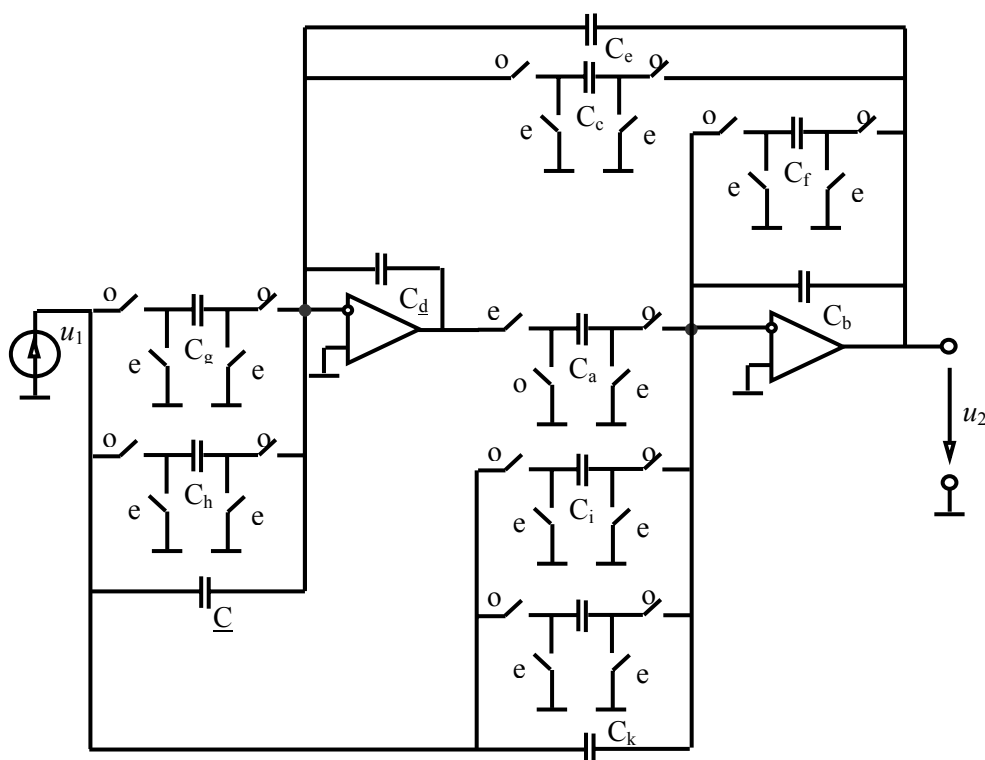
№	Исходная схема	САФ в частотной области
1	<b>При четной фазе входного и выходного напряжения</b>	
		$K_{ee} = \frac{U_2^e}{U_1^e} = \frac{\left  \begin{array}{cc cc} \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ \\ \hline \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ \end{array} \right }{\left  \begin{array}{cc cc} \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ \\ \hline \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ \end{array} \right }$
2	<b>При четной фазе входного и нечетной фазе выходного напряжения</b>	
		$K_{oe} = \frac{U_2^o}{U_1^e} = \frac{\left  \begin{array}{cc cc} \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ \\ \hline \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ \end{array} \right }{\left  \begin{array}{cc cc} \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ \\ \hline \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ \end{array} \right }$
3	<b>При нечетной фазе входного и четной фазе выходного напряжения</b>	
		$K_{eo} = \frac{U_2^e}{U_1^o} = \frac{\left  \begin{array}{cc cc} \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ \\ \hline \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ \end{array} \right }{\left  \begin{array}{cc cc} \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ \\ \hline \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ \end{array} \right }$
4	<b>При нечетных фазах входного и выходного напряжения</b>	
		$K_{oo} = \frac{U_2^o}{U_1^o} = \frac{\left  \begin{array}{cc cc} \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ \\ \hline \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ \end{array} \right }{\left  \begin{array}{cc cc} \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ \\ \hline \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ \end{array} \right }$

16.

# АНАЛИЗ ЦЕПИ С ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫМИ КОНДЕНСАТОРАМИ В Z-ОБЛАСТИ

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ С БИКВАДРАТНОЙ ФУНКЦИЕЙ ПЕРЕДАЧИ  
НАПРЯЖЕНИЯ – БИКВАД ЛАЙКЕРА-ФЛЕШЕРА

[Gielen G.G.E, Walsharts H.C.C., Sansen W.M.C.–1989]



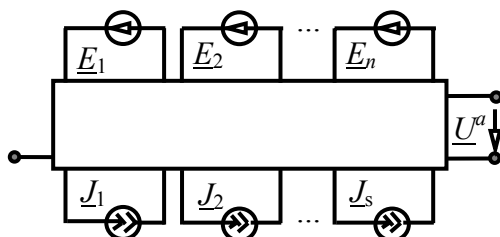
КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ НЕЧЕТНЫХ ФАЗАХ  
НАПРЯЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ SCAD

$$K_{00} = \frac{(-cd^2 * cb * ((-cl - ck) * ck + (ck + cl) * ck) + ca * cd * ce * ((-cl - ck) * ck + (ck + cl) * ck)) / z^{5/2} + (-cd^2 * (-cb * (ck + cl) * (-cj - ck) + cb * ((cl + cj + ch) * ck - (ck + cl) * ck + ck^2)) + ca * cd * (-cb * (ck + cl) * (-cl - ch) + ce * ((cl + cj + ch) * ck - (ck + cl) * ck + ck^2))) / z^2 + (cd^2 * cb * ((-cl - ck) * ck + (ck + cl) * ck) - cd^2 * cb * ((-cl + cj) * (ck + ci) - (ck + cl) * (ck + ci) - (-cj - ck) * (ck + ci)) + ca * cd * cb * ((-ck + ch) * (cg + cl) - (ck + cl) * (cg + cl) - (-cl - ch) * (cg + cl)) + ca * cd * (cb * ((-cl - ck) * cl + (ck + cl) * cl) - ce * ((-cl - ck) * ck + (ck + cl) * ck)) / z^{3/2} + (cd^2 * (-cb * (ck + cl) * (-cj - ck) + cb * ((cl + cj + ch) * ck - (ck + cl) * ck + ck^2)) + cd^2 * cb * (ck + cl + cj + ch) * (ck + ci) - ca * cd * cb * (ck + cl + cj + ch) * (cg + cl) + ca * cd * (cb * ((ck + cj + ch) * cl - (ck + cl) * cl + cl^2) - ce * ((cl + cj + ch) * ck - (ck + cl) * ck + ck^2))) / z + cd^2 * cb * ((-cl + cj) * (ck + ci) - (ck + cl) * (ck + ci) - (-cj - ck) * (ck + ci)) / z^{1/2} - cd^2 * cb * (ck + cl + cj + ch) * (ck + ci) / ((-cd^2 * (-ck + cj) * cb^2 - (-cj - ck) * cb^2) + ca * cd * ((-cl + ch) * ce * cb - (-cl - ch) * ce * cb)) / z^{5/2} + (-cd^2 * (-cl + cj + ch) * cb^2 - ck * cb^2) + ca * cd * ((-cl + cj + ch) * ce * cb - ck * ce * cb)) / z^2 + (cd^2 * (-ck + cj) * cb^2 - (-cj - ck) * cb^2) - cd^2 * ((ck + cj) * (cf + cb) * cb + (-cj - ck) * (cf + cb) * cb) + ca * cd * ((cl + ch) * (ce + ce) * cb + (-cl - ch) * (ce + ce) * cb)) / z^{3/2} + (cd^2 * (-cl + cj + ch) * cb^2 - ck * cb^2) - cd^2 * ((cl + cj + ch) * (cf + cb) * cb + ck * (cf + cb) * cb) + ca * cd * ((cl + cj + ch) * (ce + ce) * cb + ck * (ce + ce) * cb)) / z + cd^2 * ((ck + cj) * (cf + cb) * cb + (-cj - ck) * (cf + cb) * cb) / z^{1/2} + cd^2 * ((cl + cj + ch) * (cf + cb) * cb + ck * (cf + cb) * cb)).$$



# 18. НЕЯВНЫЙ МЕТОД НАЛОЖЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ (НМН)

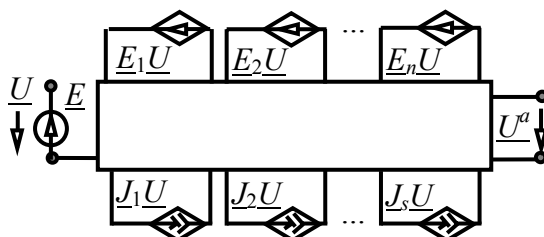
РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОМПАКТНОГО И ЭКОНОМИЧНОГО ФОРМИРОВАНИЯ СИМВОЛЬНЫХ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЦЕПЕЙ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ЧИСЛОМ НЕЗАВИСИМЫХ ИСТОЧНИКОВ



ТРАДИЦИОННЫЙ МЕТОД НАЛОЖЕНИЯ

$$O_j = \sum_{i=1}^n F_{ji} x_i$$

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ НЕЗАВИСИМЫХ ИСТОЧНИКОВ В УПРАВЛЯЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ ЕДИНИЧНОГО ИСТОЧНИКА  $\underline{E}$

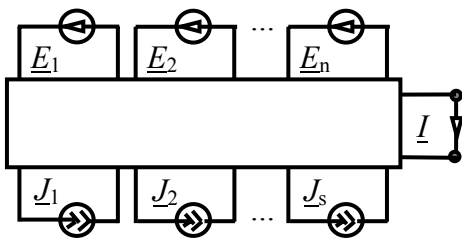


ФОРМУЛА ДЛЯ ОТКЛИКА

$$\underline{U}^a = K_{UE=1} \cdot 1 = \frac{N_{KUE=1}}{D} = \frac{\text{Diagram}}{D}$$

# 19. НМН НА ОСНОВЕ ФОРМУЛ ВЫДЕЛЕНИЯ НЕЗАВИСИМЫХ ИСТОЧНИКОВ

ИСХОДНАЯ СХЕМА

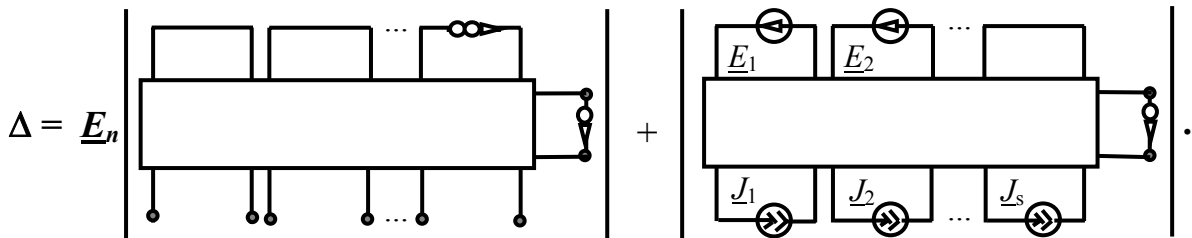


ФОРМУЛА ДЛЯ ОТКЛИКА

$$I = \frac{\left| \begin{array}{cccc} E_1 & E_2 & \dots & E_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ J_1 & J_2 & \dots & J_s \end{array} \right|}{D}$$

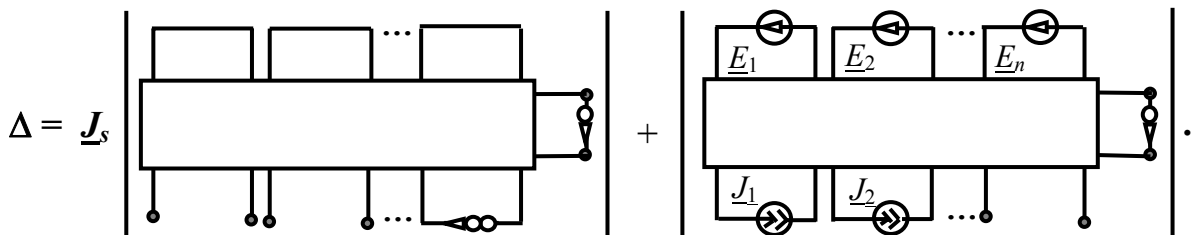
ФОРМУЛА ВЫДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ЭДС

$$\Delta = \underline{E}_n \Delta(\underline{E}_n \rightarrow \text{норатор}; E, J = 0) + \Delta(\underline{E}_n = 0).$$



ФОРМУЛА ВЫДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ТОКА

$$\Delta = \underline{J}_s \Delta(\underline{J}_s \rightarrow \text{норатор}; E, J = 0) + \Delta(\underline{J}_s = 0).$$



## 20. ЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕЯВНОГО МЕТОДА НАЛОЖЕНИЯ (НМН)

Показатели сложности символьных выражений откликов

№	Схема замещения	Количество умножений				Количество сложений и вычитаний			
		в числителе			Знаменателе	в числителе			знаменателе
		МН	НМН	Э, р.		МН	НМН	Э, р.	
1	пятиузловой сети с 10-ю источниками	22	7	3,1	2	20	13	1,5	5
2	девятиузловой сети с 4-мя источниками	34	20	1,7	25	12	11	1,1	14
3	сети с одним трехфазным источником ЭДС	45	30	1,5	40	76	53	1,4	52
4	системы с одним синхронным генератором (СГ)	471	368	1,3	412	285	200	1,4	293
5	энергосистемы с 22-мя узлами и 7-ю ЭДС	500	293	1,7	133	404	272	1,5	149
6	трехфазной системы с двумя СГ	10372	8166	1,3	5514	4791	4125	1,2	3339

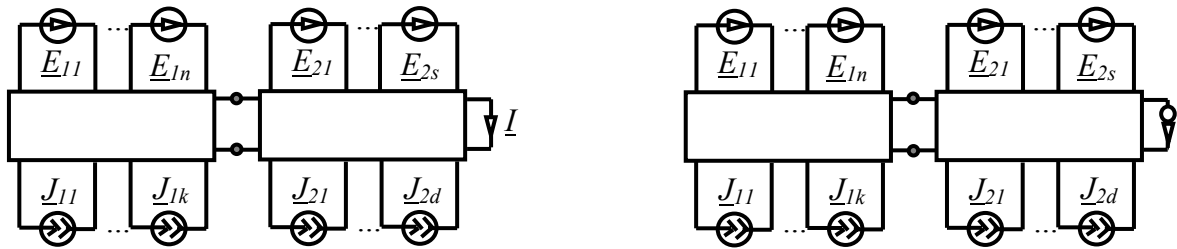
МН – традиционный метод наложения. Э,р – экономия, раз

Число операций в выражениях откликов лестничных *RLC*-цепей

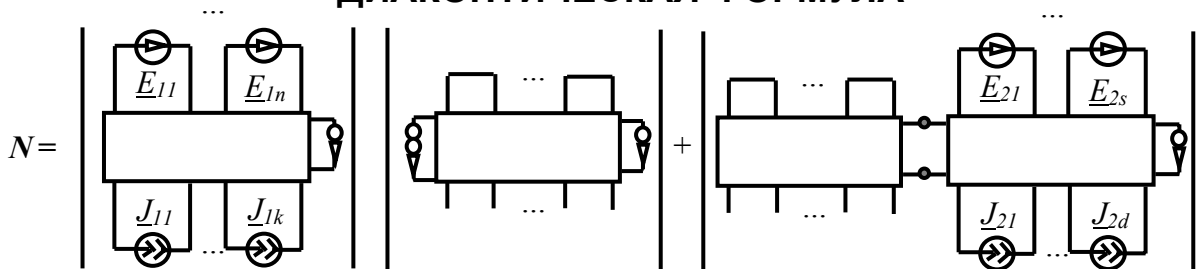
Число Г-звеньев	Количество умножений				Количество сложений			
	в числителе			в знаменателе	в числителе			в знаменателе
	МН	НМН	Э, р.		МН	НМН	Э, р.	
5	72	36	2,0	22	61	41	1,5	17
6	120	60	2,0	30	101	65	1,6	24
7	184	91	2,0	38	156	97	1,6	33
8	265	132	2,0	50	226	139	1,6	41
9	371	184	2,0	62	314	190	1,7	49

# 21. НМН В ДИАКОПТИКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

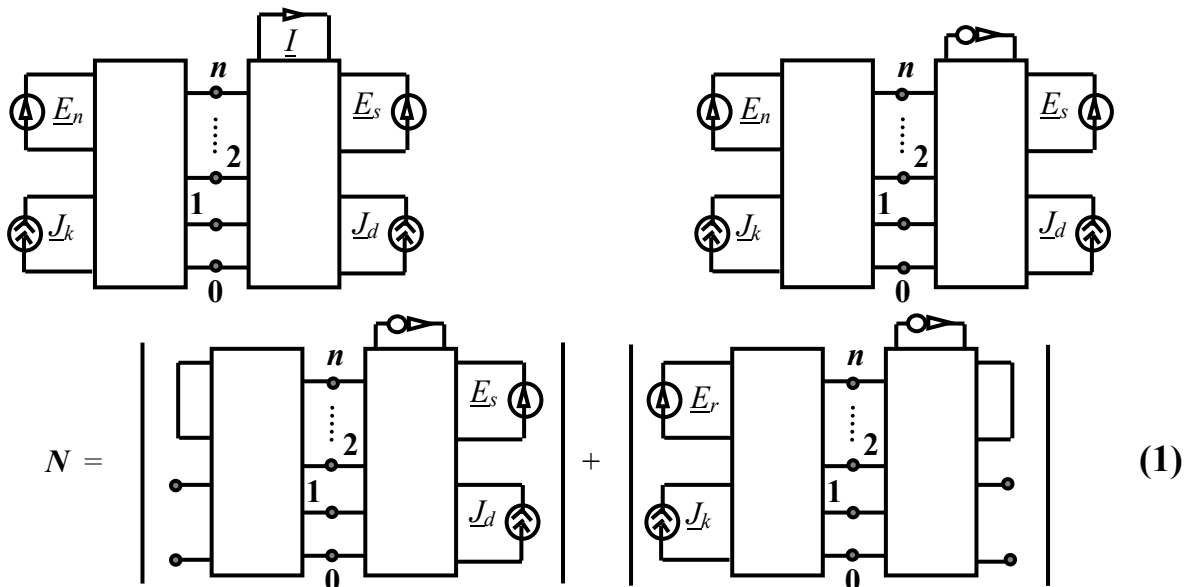
ИСХОДНАЯ СХЕМА, РАЗДЕЛЯЕМАЯ НА ПОДСХЕМЫ ПО ДВУМ УЗЛАМ,  
И СООТВЕТСТВУЮЩАЯ СХЕМА ЧИСЛИТЕЛЯ ПО НМН



ДИАКОПТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА



ДЛЯ МНОГОПОЛЮСНЫХ ПОДСХЕМ



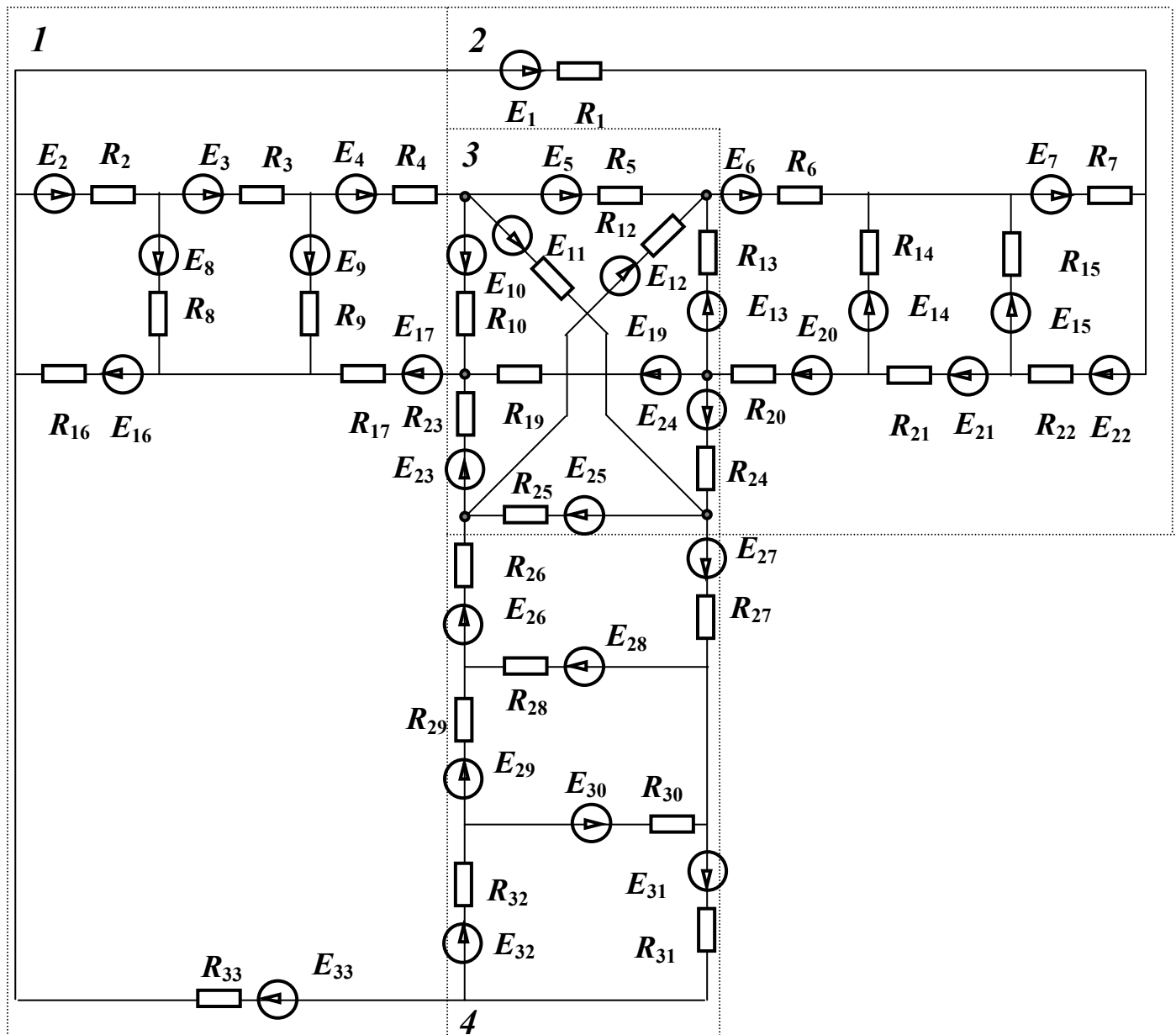
Сокращение схемных определителей и временных затрат в число раз

$$S = N/A,$$

где  $N$  – число независимых источников;  $A$  – число автономных подсхем.

# 22. АНАЛИЗ ПО НЕЯВНОМУ МЕТОДУ НАЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОРРОЗИИ

[А.В.Шагаев.-2005]



**ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОРМУЛ С ОДНОЙ ОПЕРАЦИЕЙ ДЕЛЕНИЯ  
ДЛЯ ТОКОВ ВЕТВЕЙ ПО НЕЯВНОМУ МЕТОДУ НАЛОЖЕНИЯ  
(ТРАДИЦИОННОМУ МЕТОДУ НАЛОЖЕНИЯ)**

УМНОЖЕНИЙ 68746 (384912); СЛОЖЕНИЙ 68398 (425421); ВЫЧИТАНИЙ 9701 (33428)



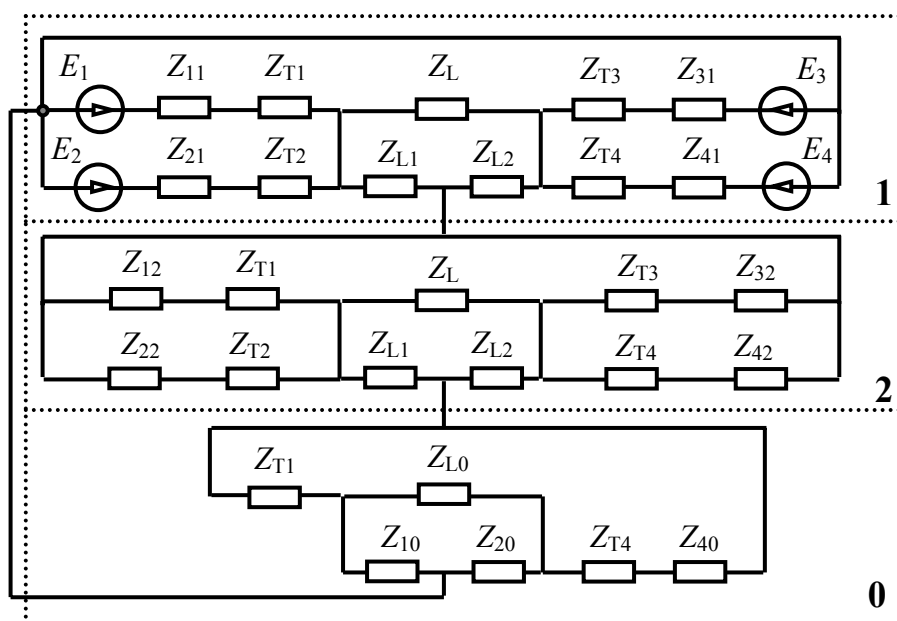
# 23. НМН ДЛЯ АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ В СИММЕТРИЧНЫХ КООРДИНАТАХ

## ОДНОФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ

ИСХОДНАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА      СХЕМА ЧИСЛИТЕЛЯ ПО НМН  
[ К.Ф.Вагнер, Р.Д.Эванс.-1936]



## СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ [ К.Ф.Вагнер, Р.Д.Эванс.-1936]



### ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ

$$\underline{E}_1 = \underline{E}_2 = \underline{E}_3 = \underline{E}_4 = j38100 \text{ В}; \quad Z_{11} = Z_{21} = j65 \text{ Ом}; \quad Z_{31} = Z_{41} = j50 \text{ Ом}; \\ Z_{12} = Z_{22} = j90 \text{ Ом}; \quad Z_{32} = Z_{42} = j30 \text{ Ом}; \quad Z_{40} = j15 \text{ Ом}; \quad Z_{T1} = Z_{T2} = j20 \text{ Ом}; \\ Z_{T3} = Z_{T4} = j30 \text{ Ом}; \quad Z_L = j22 \text{ Ом}; \quad Z_{L1} = 13Z_L / 48; \quad Z_{L2} = 35Z_L / 48; \quad Z_{L0} = j77 \text{ Ом}; \\ Z_{10} = 13Z_{L0} / 48; \quad Z_{20} = 35Z_{L0} / 48.$$

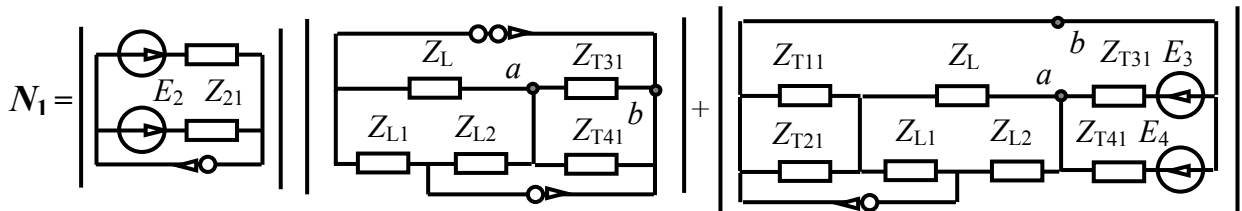
# 24. НМН ДЛЯ АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ В СИММЕТРИЧНЫХ КООРДИНАТАХ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

ДЕЛЕНИЕ СХЕМ ЧИСЛИТЕЛЯ И ЗНАМЕНАТЕЛЯ [В.Фойснер.–1904]  
ПО ДВУМ УЗЛАМ

$$N = \left| \begin{array}{|c|} \hline 1(A) \\ \hline \end{array} \right| \left| \begin{array}{|c|} \hline 2 \\ \hline \end{array} \right| \left| \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array} \right| = N_1 N_2 N_0.$$

$$D = \left| \begin{array}{|c|} \hline 1 \quad 2 \quad 0 \\ \hline \end{array} \right|$$

ЧИСЛИТЕЛЬ ПО НМН



$$N_1 = (Z_{T21}E_1 + Z_{T11}E_2)[2Z_L Z_{T31} Z_{T41} + Z_L Z_{L2}(Z_{T31} + Z_{T41})] +$$

$$+ (Z_{T41}E_3 + Z_{T31}E_4)[2Z_L Z_{T11} Z_{T21} + Z_L Z_{L2}(Z_{T11} + Z_{T21})].$$

$$N_2 = (Z_{T12} + Z_{T22})[2Z_L Z_{T32} Z_{T42} + Z_L^2(Z_{T32} + Z_{T42})] + 2Z_{T12} Z_{T22} Z_L (Z_{T32} + Z_{T42}).$$

$$N_0 = 2(Z_{T1} + Z_{T40})Z_{L0} + Z_{L0}^2.$$

ЗНАМЕНАТЕЛЬ

$$D = D_1(D_2 D_{3S} + D_{2S} D_3) + D_{1S} D_2 D_3.$$

$$D_1 = (Z_{T11} + Z_{T21})[2Z_L Z_{T31} Z_{T41} + Z_L^2(Z_{T31} + Z_{T41})] + 2Z_{T11} Z_{T21} Z_L (Z_{T31} + Z_{T41}).$$

$$D_{1S} = [Z_{T11}(Z_{T21} + Z_{L1}) + Z_{L1} Z_{T21}][(Z_L + Z_{T31})Z_{L2} Z_{T41} + Z_L Z_{T31}(Z_{L2} + Z_{T41})]$$

$$+ Z_{T11} Z_{L1} Z_{T21}[Z_{T31}(Z_{L2} + Z_{T41}) + Z_{L2} Z_{T41}].$$

$$D_{2S} = [Z_{T12}(Z_{T22} + Z_{L1}) + Z_{L1} Z_{T22}][(Z_L + Z_{T32})Z_{L2} Z_{T42} + Z_L Z_{T32}(Z_{L2} + Z_{T42})]$$

$$+ Z_{T12} Z_{L1} Z_{T22}[Z_{T32}(Z_{L2} + Z_{T42}) + Z_{L2} Z_{T42}].$$

$$D_{0S} = (Z_{10} + Z_{T1})Z_{20} Z_{T40} + [Z_{L0}(Z_{10} + Z_{T1}) + Z_{10} Z_{T1}](Z_{20} + Z_{T40}). \quad D_1 = N_1, D_0 = N_0.$$

Формула содержит операций умножения и сложения в 1,5 раза меньше, чем по традиционному методу наложения.

ТОЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

$$I = 2836565360640/1979147843 \text{ A}$$

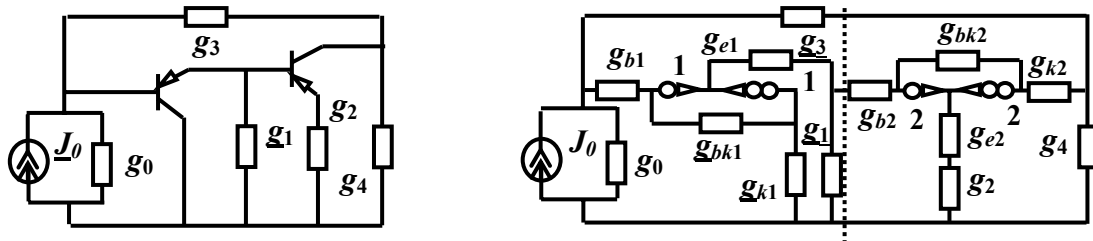
# 25. МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОПОЛЮСНИКОВ

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СОКРАЩЕНИЯ ЗАТРАТ ВРЕМЕНИ ПО СРАВНЕНИЮ С МЕТОДОМ ВЫДЕЛЕНИЯ ДВУХПОЛЮСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИБЛИЗИТЕЛЬНО В 2,5 РАЗА.

1	<h2 style="text-align: center;">Низкочастотный биполярный транзистор</h2> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> </div> <div style="width: 65%;"> <math display="block">  \begin{aligned}  &amp; (h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}) \left  \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right  + \\  &amp; + h_{12} \left  \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right  + h_{21} \left  \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right  + \\  &amp; + h_{11} \left  \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right  + h_{22} \left  \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right  + \\  &amp; + \left  \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right   \end{aligned}  </math> </div> </div>
2	<h2 style="text-align: center;">Длинная (передающая) линия</h2> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> </div> <div style="width: 65%;"> <math display="block">  \begin{aligned}  &amp; Z_B ch(\gamma l) \left( \left  \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right  + \left  \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right  \right) + \\  &amp; + Z_B^2 sh(\gamma l) \left  \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right  + sh(\gamma l) \left  \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right  + \\  &amp; + Z_B \left( \left  \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right  + \left  \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right  \right)  \end{aligned}  </math> </div> </div>

# 26. БЕЗЫЗЫТОЧНОСТЬ АНАЛИЗА ПО МЕТОДУ ВЫДЕЛЕНИЯ МНОГОПОЛЮСНИКОВ

СХЕМА УСИЛИТЕЛЯ [М.А.Шакиров.–1984]



$$\Delta = W_1^1 W_{11}^2 + W_2^1 (W_6^2 + W_{10}^2) + W_6^1 (W_2^2 + W_{10}^2) + W_8^1 (W_3^2 + W_6^2) + W_{10}^1 (W_2^2 + W_3^2 + W_6^2) + W_{11}^1 W_1^2.$$

$$W_1^1 = g_{bk1}(g_0(g_{e1} + g_{k1} + g_{b1}) + g_{b1}g_3 + (g_{b1} + g_3)(g_{e1} + g_{k1})) + g_{b1}g_{k1}(g_0 + g_3);$$

$$W_2^1 = g_{bk1}(g_0((g_{k1} + g_{b1})(g_{e1} + g_1) + g_{e1}g_1) + g_{b1}g_3g_1 + (g_{b1} + g_3)(g_{e1}(g_{k1} + g_1) + g_{k1}g_1)) + g_{b1}g_{k1}(g_0(g_{e1} + g_1) + g_3g_1);$$

$$W_6^1 = g_{bk1}(g_0(g_{e1} + g_{k1} + g_{b1})g_3 + g_{b1}g_3g_{k1}) + g_{b1}g_{k1}g_0g_3; \quad W_8^1 = g_{b1}g_3g_{k1}g_{e1}; \quad W_{10}^1 = g_{bk1}g_{b1}g_3g_{e1};$$

$$W_{11}^1 = g_{bk1}(g_0((g_{k1} + g_{b1})(g_{e1} + g_1) + g_{e1}g_1)g_3 + g_{b1}g_3(g_{e1}(g_{k1} + g_1) + g_{k1}g_1)) + g_{b1}g_{k1}g_0(g_{e1} + g_1)g_3.$$

$$W_1^2 = g_{e2}g_2g_{bk2} + (g_{e2} + g_2)(g_{b2}(g_{bk2} + g_{k2}) + g_{bk2}g_{k2}); \quad W_2^2 = g_{e2}g_2g_{bk2}g_{b2}; \quad W_3^2 = g_{e2}g_2g_{b2}g_{k2};$$

$$W_6^2 = g_{e2}g_2g_{b2}g_{k2}; \quad W_6^2 = g_{e2}g_2g_{bk2}(g_{k2} + g_4) + (g_{e2} + g_2)(g_{b2}(g_{bk2} + g_{k2}) + g_{bk2}g_{k2})g_4;$$

$$W_{10}^2 = (g_{e2} + g_2)g_{b2}g_{bk2}g_{k2}; \quad W_{11}^2 = g_{e2}g_2g_{bk2}(g_{k2} + g_4)g_{b2} + (g_{e2} + g_2)g_{b2}g_{bk2}g_{k2}g_4.$$

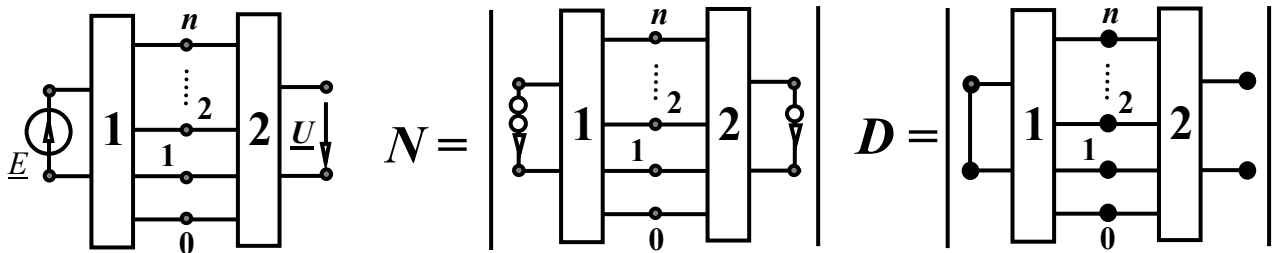
Вычислительные характеристики различных формул с одной операцией арифметического деления

№	Метод построения формулы	Число операций			Число пар избыточных слагаемых
		*	+	-	
1	Метод выделения многополюсников	81	54	0	0
2	Программа CIRMUL по методу выделения многополюсников	114	64	0	0
3	Система Maple с оператором свертывания simplify(, 'size')	185	219	0	0
4	Безызыбыточных формул [В.В.Филаретов.–1998]	93	69	1	3
5	Двоичных векторов [В.В.Филаретов.–2001]	67	45	3	6
6	Симметричных безызыбыточных формул [В.В.Филаретов.–2005]	81	59	2	7
7	Блочно-матричный	73	75	4	67

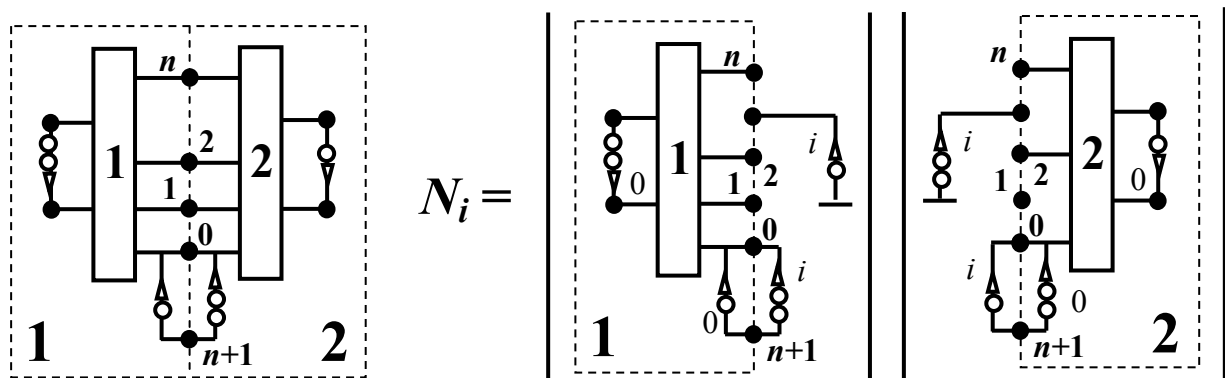
# 27. НЕРАВНОВЕСНЫЕ СХЕМНЫЕ МИНОРЫ

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПОЛОВИННОГО СЕЧЕНИЯ СХЕМЫ ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ АНАЛИЗА

ИСХОДНАЯ СХЕМА. СХЕМЫ ЧИСЛИТЕЛЯ И ЗНАМЕНАТЕЛЯ  
[Я.Браун.-1966]



ОБОСНОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ СХЕМНЫХ МИНОРОВ (НСМ)  
(на основе метода двоичных векторов В.В.Филаретова.-2001)



ФОРМУЛА ДЛЯ ЧИСЛИТЕЛЯ ПО МЕТОДУ НЕРАВНОВЕСНЫХ СХЕМНЫХ МИНОРОВ

$$N = - \sum_{i=1}^{\psi_{n+1}} \Delta_1^i(x_1 x_2 \dots x_n 1 \perp y_1 y_2 \dots y_n 0) \Delta_2^i(\underline{x}_1 \underline{x}_2 \dots \underline{x}_n 0 \perp \underline{y}_1 \underline{y}_2 \dots \underline{y}_n 1)$$

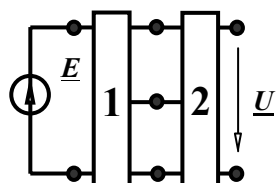
СХЕМНО-АЛГЕБРАИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА

$$N_i = \left| \begin{array}{c} \text{Circuit diagram} \\ \text{Circuit diagram} \end{array} \right| \Psi_{n+1} = \sum_{i=0}^n C_n^{i-1} C_n^i$$

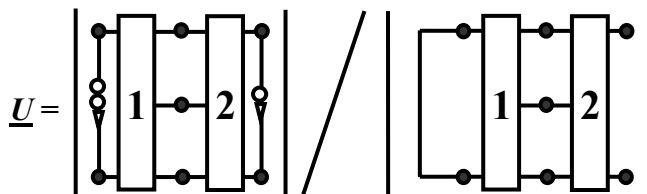
ЧИСЛО НСМ

28. **МЕТОД НЕРАВНОВЕСНЫХ  
СХЕМНЫХ МИНОРОВ  
МЕТОД ПОЛОВИННОГО СЕЧЕНИЯ**

ИСХОДНАЯ СХЕМА

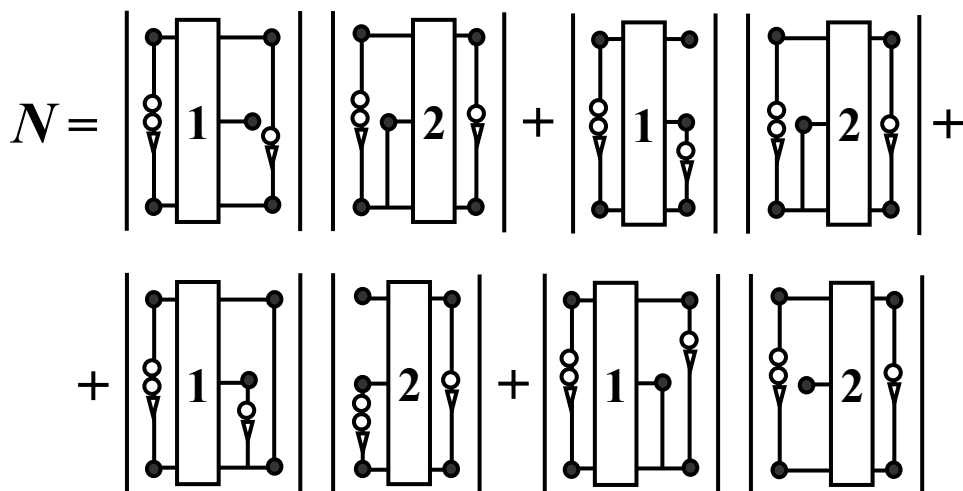


ФОРМУЛА ДЛЯ ОТКЛИКА [Я.Браун.-1966]

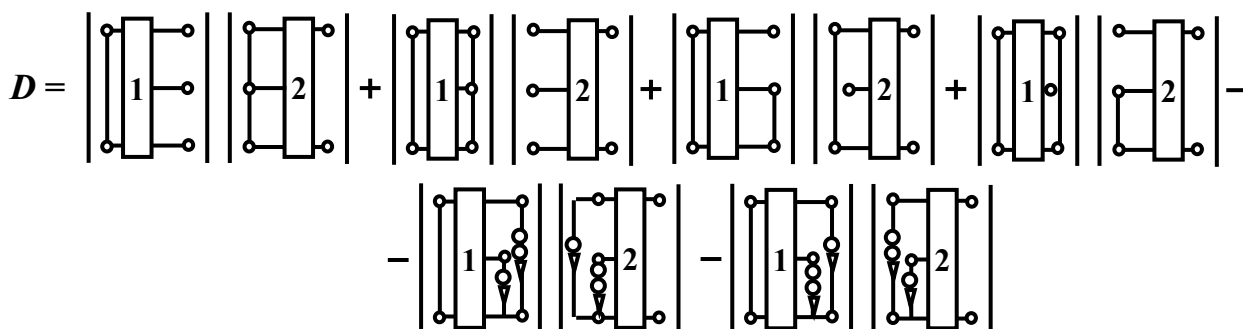


**ДИАКОПТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ ЧИСЛИТЕЛЯ  
НА ОСНОВЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ СХЕМНЫХ МИНОРОВ**

$$N = \Delta_1(0001)\Delta_2(1110) - \Delta_1(0010)\Delta_2(1101) - \\ - \Delta_1(0111)\Delta_2(1000) + \Delta_1(1011)\Delta_2(0100).$$



**ДИАКОПТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ ЗНАМЕНАТЕЛЯ  
[В.В.Филаретов.-2001]**



## 29. ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДА НЕРАВНОВЕСНЫХ СХЕМНЫХ МИНОРОВ

Сравнение числа равновесных  $V_{n+1}$  и неравновесных  $\Psi_{n+1}$  схемных миноров

$n$ узлов подсхемы	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_n$	2	6	20	70	252	924	3432	12870	48620
$\Psi_n$	1	4	15	56	210	792	3003	11440	43758
$\frac{V_n}{\Psi_n}$	2,00	1,50	1,33	1,25	1,20	1,17	1,14	1,13	1,11

Сравнение числа слагаемых  $\alpha_n$  и  $\beta_n$  в диакоптических формулах на основе равновесных и неравновесных миноров соответственно

$n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{\alpha_n}{\beta_n}$	6,00	5,00	4,70	4,50	4,40	4,33	4,29	4,25	4,22

Сокращение числа операций при использовании общего трехузлового сечения для нахождения числителя и знаменателя СПФ

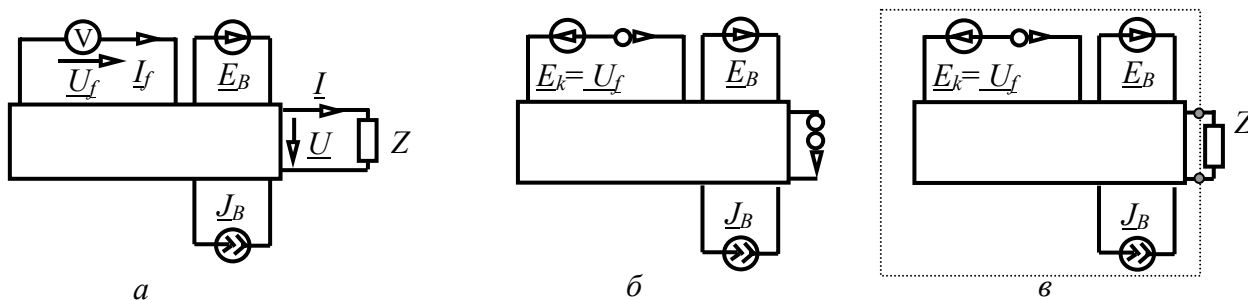
$q$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$C_q^3$	120	1140	4060	9880	19600	34220	57740	82160	117480

Экономия времени приблизительно в 1,7...4,8 раза при анализе с помощью половинного сечения

№	Схема	Время при разных сечениях	Время при общем сечении	Экономия раз
1	ПФ	2,4 с	0,49 с	4,8
2	ИУ	64 с	19 с	3,2
3	ОУ $\mu A741$	42 с	24 с	1,8
4	Сеть, 28 узлов	50 с	29 с	1,7
5	Сеть, 38 уз.	3 мин. 29 с	1 мин. 40 с	2,1

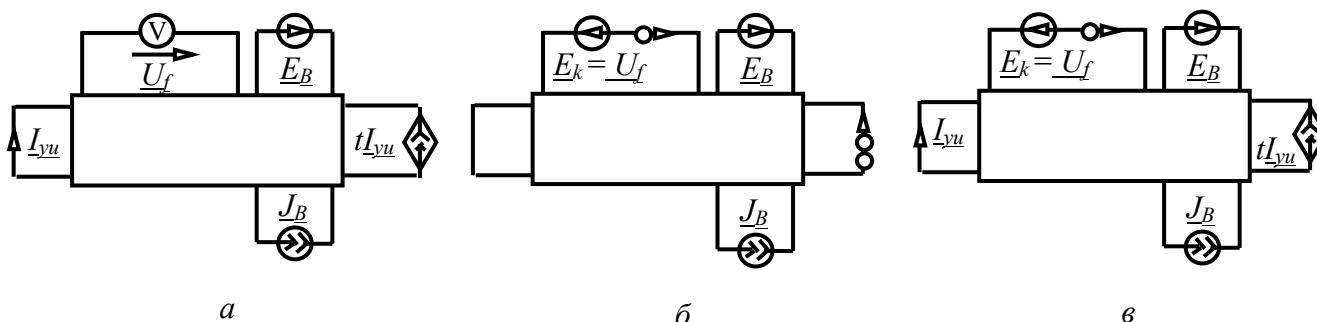
# 30. МЕТОД КОСВЕННОЙ КОМПЕНСАЦИИ ДЛЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИМВОЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

## КОМПЕНСАЦИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ $Z_s$ С НЕИЗВЕСТНЫМ ПАРАМЕТРОМ



СХЕМЫ: ИСХОДНАЯ (а); С КОМПЕНСИРОВАННЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ (б) И С ДЕКОМПЕНСИРОВАННЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ (в)

## КОМПЕНСАЦИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ИСТОЧНИКА (УИ) С НЕИЗВЕСТНЫМ ПАРАМЕТРОМ



## ФОРМУЛЫ ДЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ПАРАМЕТРА УИ

$$Z_s = -\frac{\Delta_z}{\Delta^z}; \quad b = -\frac{\Delta(t=0)}{\Delta(t \rightarrow N)},$$

где  $t=0$  и  $t \rightarrow N$  – операции нейтрализации и преобразования УИ в нулор соответственно;  $\Delta$  – определитель схем с декомпенсированным элементом; верхний (нижний) индекс  $z$  означает удаление элемента (замену элемента короткой).

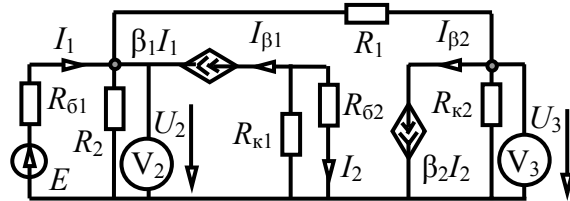
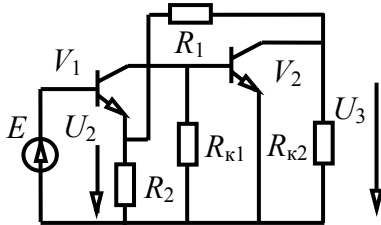


# 31. ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ДИАГНОСТИРУЕМОСТИ ЦЕПЕЙ

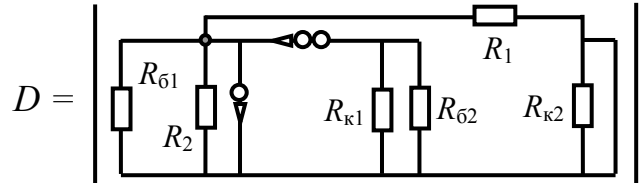
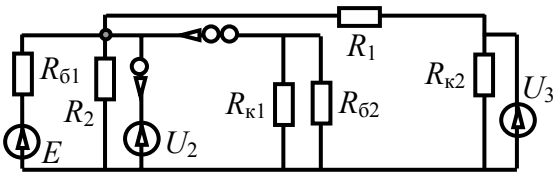
№	Классы схем, для которых не выполняются условия диагностируемости
1	
2	
3	

## 32. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ГРАНИЦЫ ДИАГНОСТИРУЕМОСТИ ЦЕПИ

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ ПАРАМЕТРЫ  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , ИСПОЛЬЗУЯ  
ИЗМЕРЕННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ  $U_1$  и  $U_3$ .



УСЛОВИЕ НЕНУЛЕВОГО ОПРЕДЕЛИТЕЛЯ СКЭ



$$D = -R_1 R_2 R_{\delta 1} R_{k2} (R_{\delta 2} + R_{k1}) \neq 0 \rightarrow R_1 \neq 0, R_2 \neq 0, R_{\delta 1} \neq 0, R_{k2} \neq 0 \\ \text{и } R_{\delta 2} \neq 0 \text{ или } R_{k1} \neq 0.$$

УСЛОВИЕ НЕНУЛЕВОГО РЕЖИМА

Определитель схемы в режиме анализа

$$D_a = R_2 \{ \beta_2 R_{k1} R_{k2} \beta_1 + (R_{k1} + R_{\delta 2}) [(R_1 + R_{k2})(1 + \beta_1) + R_{\delta 1}] \} + R_{\delta 1} (R_{k1} + R_{\delta 2}) (R_1 + R_{k2}) \neq 0.$$

Числители токов УИ

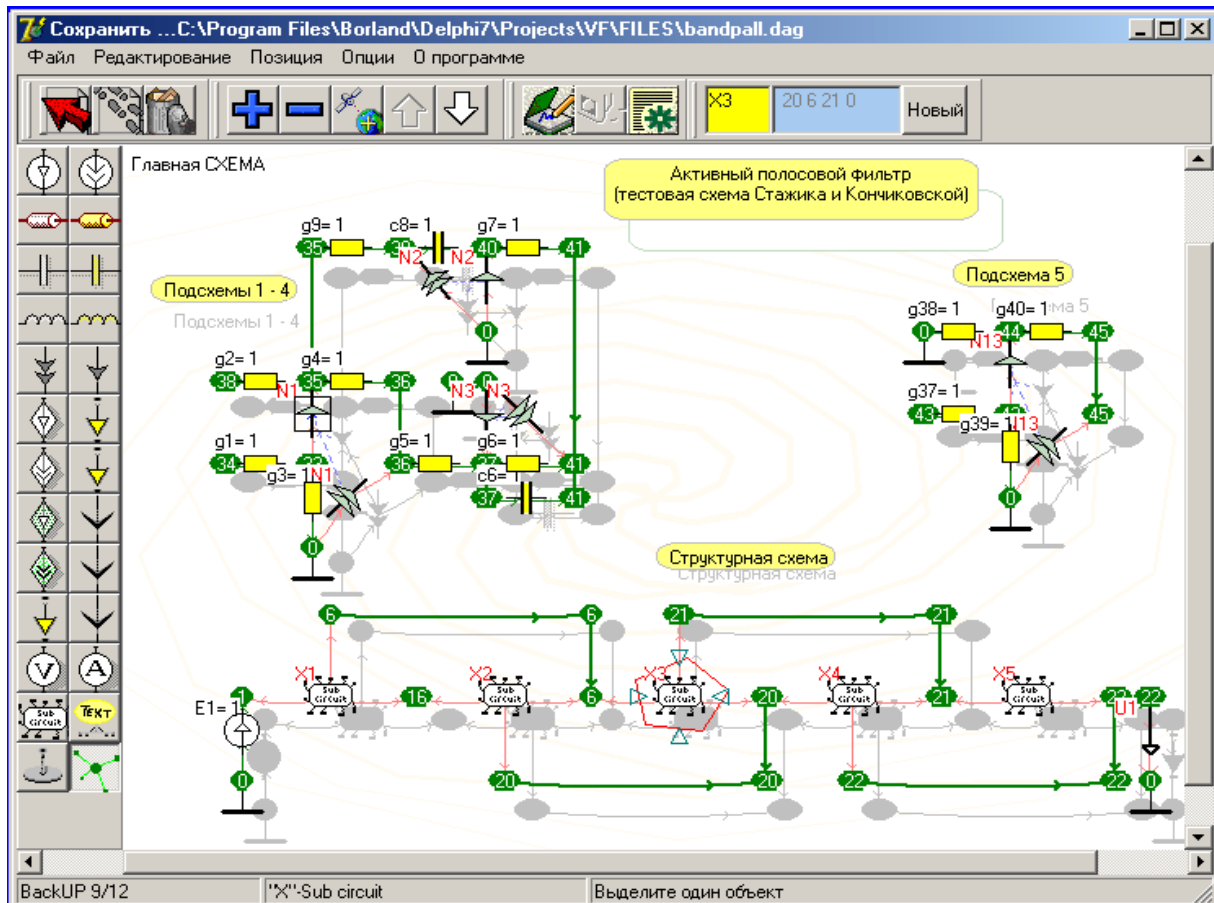
$$N_{\beta 1} = \beta_1 (R_{k1} + R_{\delta 2}) (R_2 + R_1 + R_{k2}) E \neq 0, \quad N_{\beta 2} = -\beta_1 R_{k1} \beta_2 (R_1 + R_2 + R_{k2}) E \neq 0 \rightarrow \\ \beta_1 \neq 0, R_{k1} \neq 0.$$

ИСКОМЫЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ПАРАМЕТРОВ, ПОЛУЧЕННЫЕ  
С ПОМОЩЬЮ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ФОРМУЛ

$$\beta_1 = \frac{U_2 [R_{\delta 1} [R_1 + R_2] + R_1 R_2] - R_2 (E R_1 + U_3 R_{\delta 1})}{R_1 R_2 (E - U_2)},$$

$$\beta_2 = \frac{(R_{\delta 2} + R_{k1}) R_{\delta 1} R_2 [R_{k2} U_1 - (R_1 + R_{k2}) U_3]}{R_{k1} R_{k2} \{ -U_1 [R_{\delta 1} (R_1 + R_2) + R_1 R_2] + R_2 (E R_1 + U_3 R_{\delta 1}) \}}.$$

# 33. КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА И ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ SCAD



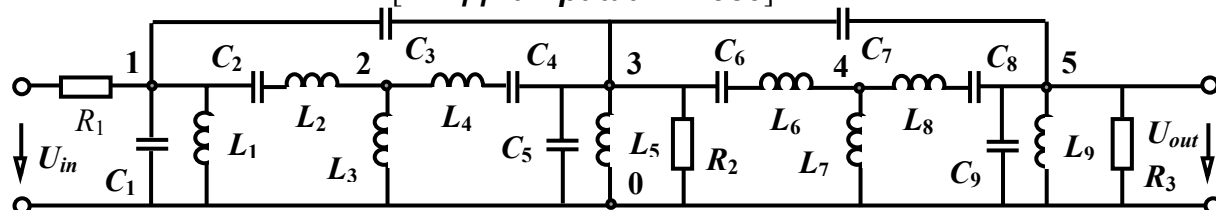
Файл	Редактирование	Позиция	Оп
	Новая СХЕМА		
	Загрузить Файл		F3
	Сохранить Файл		F2
	Сохранить файл как		
	Загрузить из файла		Ctrl+F3
	Сохранить выделение		Ctrl+F2
	Выход		

Опции	О программе
	Установки F7
	Окно Подсхемы F8
	Окно Схемы Ctrl+F8
	Текстовый режим Ctrl+F6
	Скрыть указатель Ctrl+Alt+N
Сохранить экран Ctrl+P	
Копирование в Clipboard	

# 34. ХАРАКТЕРИСТИКИ ФУНКЦИЙ КВАРЦЕВОГО ФИЛЬТРА

## СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ КВАРЦЕВОГО ФИЛЬТРА 14-го ПОРЯДКА

[Р.В.Дмитришин.–1980]



### КОЛИЧЕСТВО ОПЕРАЦИЙ В РАЗЛИЧНЫХ СИМВОЛЬНЫХ ФУНКЦИЯХ КОЭФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЯ

№	Операции→ Функции↓	*	*	:	+	-	=
		:	*	:	+	-	=
1	Комбинированная ДРФ по МСАР и НСМ	56	43	13	41	0	14
2	Последовательная функция по МСАР	75	58	17	50	1	39
3	ПФ по методу блочного Гауссова исключения	79	59	20	22	11	42
4	Последовательная формула по методу схемотанализа [М.А.Шакиров.–1980]	94	50	44	30	32	68
5	ПФ по методу редукции узлов [Розен.–1924]	102	72	30	34	0	54
6	ПФ с одной операцией деления [В.В.Филаретов.–2001]	117	116	1	84	0	27
7	Последовательная функция по Гауссу	121	81	40	22	31	111
8	Единая свернутая ДРФ по методу НСМ	279	278	1	96	0	1
9	Единая свернутая ДРФ по МДВ [В.В.Филаретов.–2001]	310	309	1	106	2	1
10	Единая функция по системе Maple	3075	3073	2	3374	0	1
11	Групповая ДРФ [по Горнеру]	13130	13129	1	6432	0	1
12	Каноническая ДРФ	13435	13434	1	6432	0	1
13	Развернутая ДРФ	96057	96056	1	6432	0	1

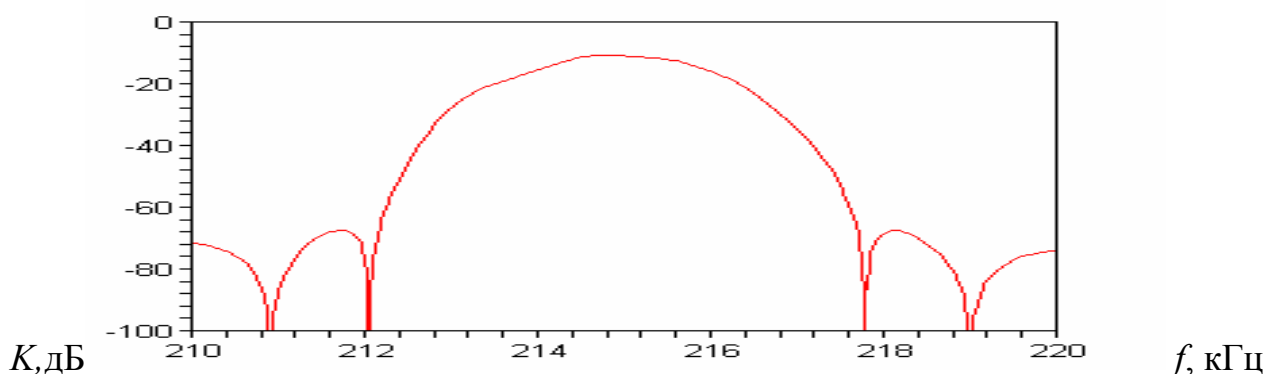
ДРФ – дробно-рациональная функция. МСАР – метод схемно-алгебраической редукции. НСМ – неравновесные схемные миноры. ПФ – последовательная формула. РСМ – равновесные схемные миноры.

# 35. ТОЧНОСТЬ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ ФИЛЬТРА

КОЛИЧЕСТВО ВЕРНЫХ РАЗРЯДОВ В ЧИСЛЕННЫХ ЗНАЧЕНИЯХ  
ОПРЕДЕЛИТЕЛЯ И КОМПЛЕКСНОЙ ЧАСТОТНОЙ ФУНКЦИИ

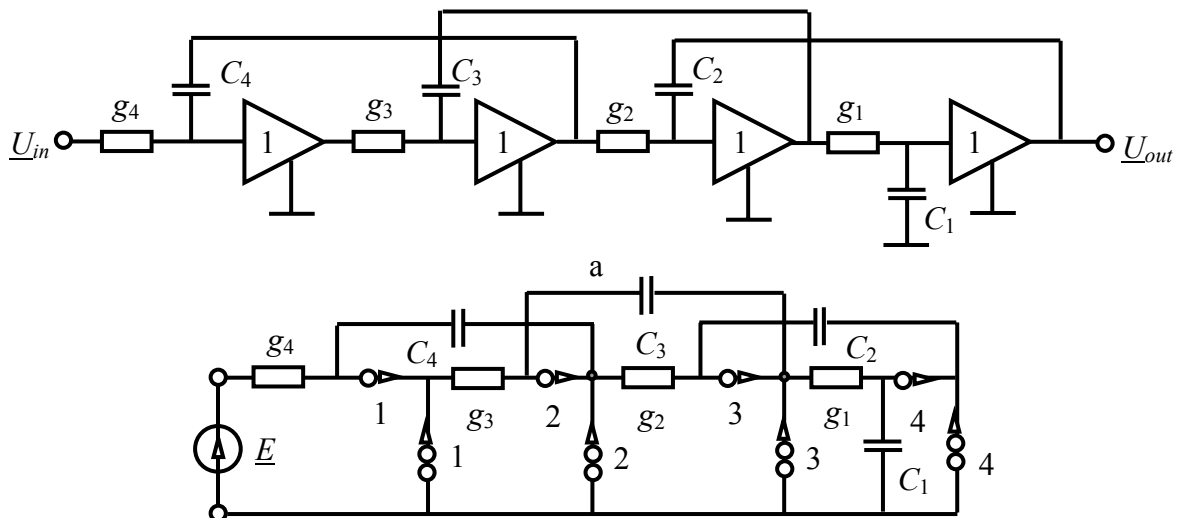
№	Тип символьной функции	Число (доля в %) верных знаков при различных разрядных сетках			
		60	30	18	8
1	<i>Комбинированная ДРФ по МСАР и НДВ</i>	57 (95)	26 (87)	14 (78)	5 (63)
2	<i>Последовательная функция по МСАР</i>	57 (95)	27 (90)	14 (78)	5 (63)
3	ПФ по методу блочного Гауссова исключения	57 (95)	26 (87)	15 (83)	5 (63)
4	Последовательная функция по методу ЭМГ	57 (95)	26 (87)	15 (83)	5 (63)
5	ПФ по методу редукции узлов	56 (93)	26 (87)	15 (83)	4 (50)
6	ПФ с одной операцией деления	57 (95)	26 (87)	15 (83)	5 (63)
7	ПФ по методу Гаусса	57 (95)	26 (87)	14 (78)	5 (63)
8	Единая свернутая функция по методу НСМ	54 (90)	24 (80)	11 (61)	1 (13)
9	Единая свернутая функция по методу РСМ	54 (90)	24 (80)	11 (61)	1 (13)
10	Единая функция по системе Maple	46 (77)	15 (50)	3 (17)	0 (0)
11	Групповая функция	45 (75)	15 (50)	3 (17)	0 (0)
12	Каноническая функция	45 (75)	15 (50)	3 (17)	0 (0)
13	Развернутая ДРФ	45 (75)	14 (47)	1 (5,6)	0 (0)

АЧХ коэффициента передачи фильтра



# 36. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА САЛЛЕНА-КИ и КУНДЕРТА  
[Хейнлейн В.Е., Холмс В.Х.– 1980]



ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЙ ПОЛИНОМ (SCAD)

$$D2 := c4c2c1c3p^4 + g4c2c1c3p^3 + g3g4c2p^2c1 + g2g3g4c1p + g2g3g4g1$$

Критерий Раусса-Гурвица [В.К.Захаров, Ю.И.Лыпарь.–1984].

$$del = a_1a_2a_3 - a_0a_3^2 - a_4a_1^2 > 0,$$

Преобразование с помощью системы Maple.

$$del := g2 g3^2 g4^3 c1^3 c2^2 c3 - g2 g3 g4^3 g1 c2^2 c1^2 c3^2 - c4 c2 c1^3 c3 g2^2 g3^2 g4^2$$

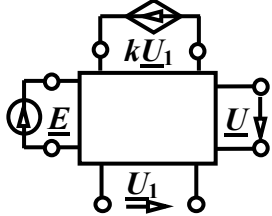
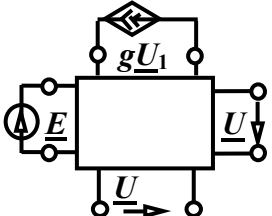
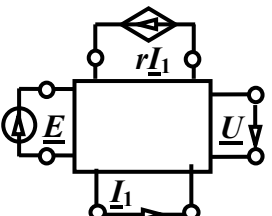
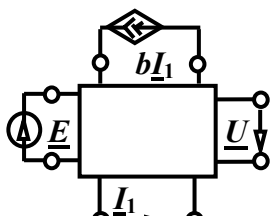
$$del1 := \text{simplify}(del, 'size').$$

$$del1 := -(-g4 (g3 c1 - c3 g1) c2 + c4 c1 g2 g3) g2 c3 c1^2 g3 c2 g4^2$$

УСЛОВИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СХЕМЫ

$$\frac{g_1c_3}{c_1g_3} + \frac{g_2c_4}{c_2g_4} < 1$$

# 37. ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

№	Исходная схема	САФ для чувствительности
1	<p>Параметр ИНУН <math>k</math></p> 	$S_k^K = - \frac{\begin{matrix} k \\ \text{[Circuit diagrams for } S_k^K \text{ numerator]} \end{matrix}}{\begin{matrix} \text{[Circuit diagrams for } S_k^K \text{ denominator]} \end{matrix}}$
2	<p>Параметр ИТУН <math>g</math></p> 	$S_g^K = - \frac{\begin{matrix} g \\ \text{[Circuit diagrams for } S_g^K \text{ numerator]} \end{matrix}}{\begin{matrix} \text{[Circuit diagrams for } S_g^K \text{ denominator]} \end{matrix}}$
3	<p>Параметр ИНУТ <math>r</math></p> 	$S_r^K = - \frac{\begin{matrix} r \\ \text{[Circuit diagrams for } S_r^K \text{ numerator]} \end{matrix}}{\begin{matrix} \text{[Circuit diagrams for } S_r^K \text{ denominator]} \end{matrix}}$
4	<p>Параметр ИТУТ <math>b</math></p> 	$S_b^K = - \frac{\begin{matrix} b \\ \text{[Circuit diagrams for } S_b^K \text{ numerator]} \end{matrix}}{\begin{matrix} \text{[Circuit diagrams for } S_b^K \text{ denominator]} \end{matrix}}$

## 38. **ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1. ОАО «Татэнерго» (г. Казань). Материалы работы использованы для оценки мгновенного состояния (мониторинга) сети 110кВ ОАО «Татэнерго».

2. Завод крупнопанельного домостроения ЗАО «Завод КПД-1» (г. Ульяновск). Программа SCAD использована при расчете нагревательных сетей для оптимизации теплового режима и снижения энергозатрат.

3. Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники РАН. Материалы работы использованы для расчета отдельных узлов электронной аппаратуры и при проведении исследований эквивалентных шумовых схем биполярных транзисторных структур.

4. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ». Программа SCAD использована для формирования реакций линейных цепей, а также слабо нелинейных цепей по процедуре Пикара.

5. Пензенский государственный университет. Символьная методика используется для формирования символьных выражений для электрических фильтров, усилителей и линейных преобразователей.

6. Ченстоховский политехнический институт (Польша). Программа SCAD использовалась при решении диагностической задачи минимального числа наблюдаемых ветвей.

7. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций. Блок символьного анализа использован путем включения его в состав системы моделирования электрических цепей FASTMEAN 4.0. Методика символьного анализа используется при формировании, анализе и оптимизации операторных схемных функций ключевых устройств с многоконтурными обратными связями.

8. Ульяновский государственный технический университет. Схемно-алгебраические методики составили основу большинства разделов читаемого автором курса «Основы теории цепей» для студентов специальности «Радиотехника», а также дисциплины «Электротехника и электроника» для специальности «Информационные системы и технологии».