

# РЕАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ НА ОСНОВЕ ТРАНСКОНДУКТИВНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

К. С. Горшков, В. В. Филаретов

*Предложен метод реализации структурных схем электрических цепей на транскондуктивных усилителях (усилителях проводимости). Разработан алгоритм транскондуктивной реализации. Обсуждаются особенности его применения для проектирования высокоточных усилительных устройств. Приводятся результаты моделирования схем, полученных с помощью метода транскондуктивной реализации, и дается сравнение с традиционным исполнением на операционных усилителях.*

*Ключевые слова: структурная схема, транскондуктивный усилитель (транскондуктор), операционный усилитель, сигнальный граф, матрица, выделение ветви или управляемого источника, МОП–технология, схемотехническое моделирование.*

*A method of realization of block–diagram of electronic devices to the circuit based on the transconductance amplifiers is proposed. The algorithm of transconductance conversion is presented. The features of the application of the transconductance amplifiers in the design of high-precision amplifiers is discussed. Results of using of method are confirmed by circuit simulation programs. A comparison between transconductance amplifiers based circuits and conventional operational amplifiers based circuits is included.*

*Key words: block–diagram, transconductance amplifier (transconductor), operational amplifier, signal–flow graphs, matrix, extraction of a branch or a controlled source, MOS design, circuit simulation.*

**Структурные схемы и их реализация на операционных усилителях.** В проектировании радиоэлектронных средств для эскизного анализа и синтеза схем часто используются структурные схемы электрических цепей.

Структурная схема отображает физические связи между реальными элементами цепи или системы, определяющие информационные, функциональные и энергетические преобразования сигналов [1–5].

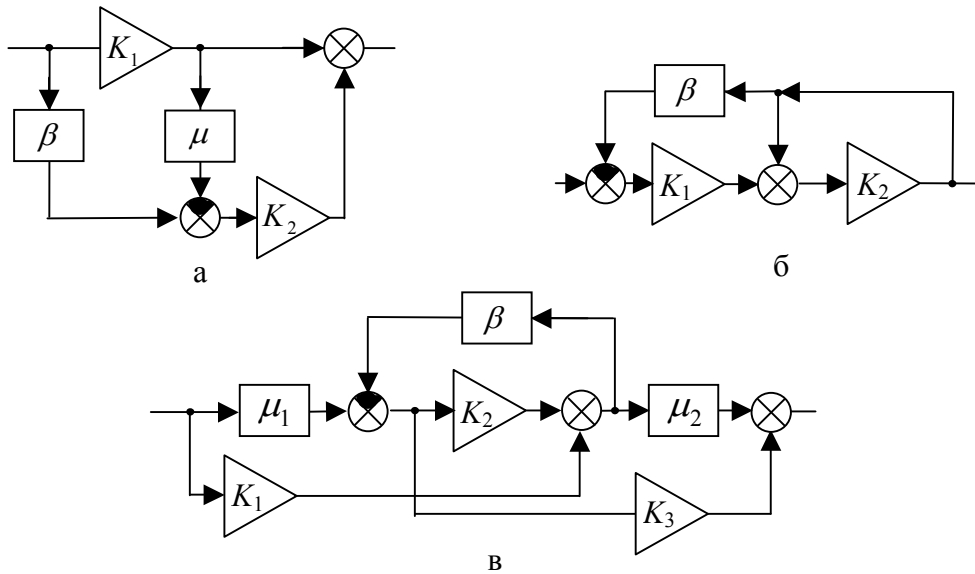


Рис. 1. Структурные схемы усилителей с аддитивной коррекцией и с комбинированной обратной связью

Структурные схемы являются по существу языком инженера–проектировщика электронной аппаратуры. Они активно используются на всех трех основных этапах проектирования: систематическом, схемотехническом и конструкторском. Например, на рис. 1 изображены структурные схемы усилительных устройств с аддитивной коррекцией погрешности (рис. 1,а и рис. 1,в) [6, 7] и с комбинированной обратной связью (рис. 1,б) [5]. Отметим, что структуры на рис. 1,а и рис. 1,б содержат блок, коэффициент передачи которого равен единице, как это показано на рис. 2,а и рис. 2,б, соответственно, но в большинстве случаев его специально не выделяют [5].

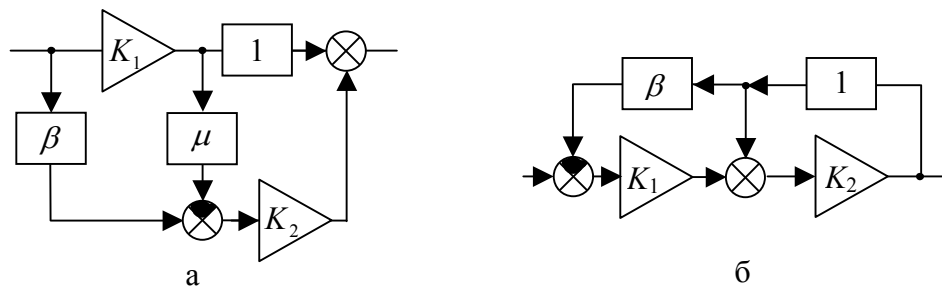


Рис. 2. Структурные схемы с блоком единичного коэффициента передачи

Ниже представлены выражения для коэффициентов передачи структурных схем на рис. 1,а–в [5].

$$S = K_1 + K_2\beta - K_1K_2\mu, \quad (1)$$

$$S = (K_1K_2)/1 + K_1K_2\beta - K_2, \quad (2)$$

$$S = \mu_2(K_1 + \mu_1K_2) + (K_3(\mu_1 - K_1\beta))/1 + K_2\beta. \quad (3)$$

Вопросы топологического синтеза на уровне структурных схем и схемных моделей электрических цепей достаточно полно изучены [4, 5]. Однако следует отметить, что сам процесс проектирования, как и любая творческая деятельность, плохо поддается формализации, поэтому очень важно, чтобы переходы от одного этапа проектирования электронной аппаратуры к другому были максимально прозрачны и однозначны. К сожалению, это требование трудно выполнимо при реализации структурных схем электрическими схемами с использованием традиционных методов и элементной базы. Так, на рис. 3,а–в представлены реализации структурных схем рис. 1,а–в на базе операционных усилителей напряжения [5]. В схемах на рис. 3,а и б усилители УН2 и (ПН2) соответственно функционируют как повторители, и имеют дополнительные входы для реализации  $KУ=1$ , которые на рисунке специально не указаны.

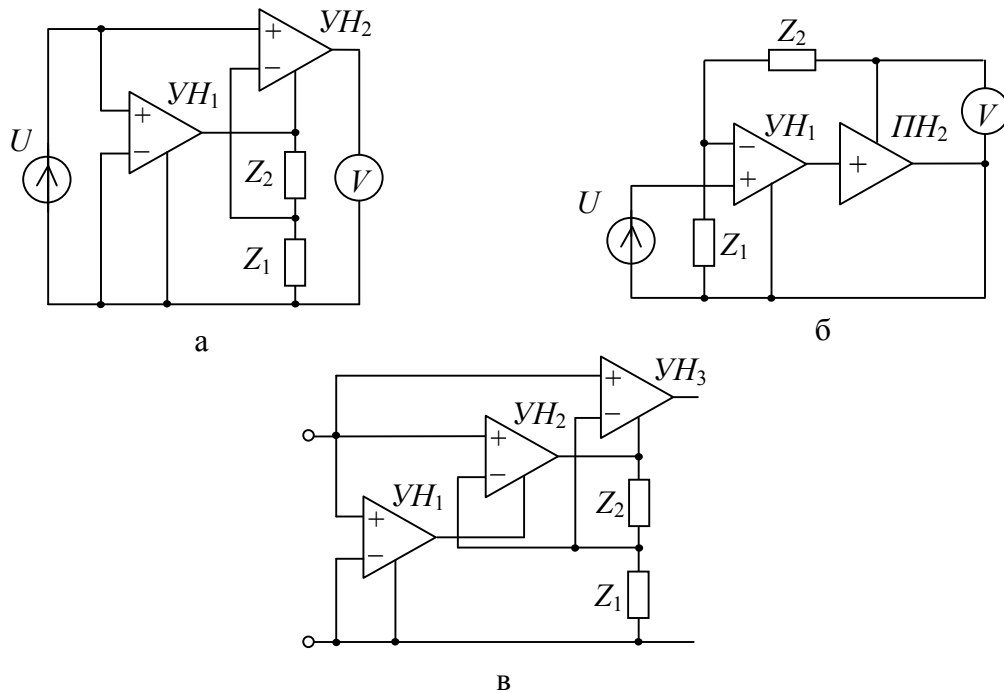


Рис. 3. Примеры усилителей с аддитивной коррекцией и с комбинированной обратной связью

Главным недостатком существующего эвристического подхода к реализации следует признать отсутствие наглядности перехода от структурной схемы к схеме принципиальной. Более того, уже само использование традиционной прецизионной элементной базы неизбежно ведет к увеличению погрешности при реализации. Получившиеся в результате анализа схем на рис. 3,а–в выражения коэффициентов усиления, будут соответствовать выражениям (1) – (3) для исходных структурных схем лишь при выполнении условий настройки. Применение условий настройки необходимо даже в том случае, если влияние входных и выходных сопротивлений усилителей напряжения пренебрежимо мало. Покажем это, проведя расчет схем усилительных устройств на рис. 3,а–в используя систему моделирования SCAD–2006 (<http://levul.org/sm/symbolic.htm>) [8].

Схемы рис. 3,а и рис. 3,б соответствуют структурным схемам рис. 1,а и рис. 1,б при  $\mu = Z_1/(Z_1 + Z_2)$  и  $\beta = 1$  (условие настройки):

$$S = \frac{K_1(Z_1 + Z_2) + K_2(Z_1 + Z_2) - K_1Z_1K_2}{(Z_1 + Z_2)} \quad (4)$$

$$S = K_1Z_1K_2/Z_1(K_1K_2 + 1 - K_2) \quad (5)$$

Для схемы рис. 3,в справедливо  $\beta = Z_1/(Z_1 + Z_2)$ , и действительно условие настройки  $\mu_1 = \mu_2 = 1$ .

$$S = \frac{Z_1(K_1(1 - K_3) + K_2 + K_3) + Z_2(K_1 + K_2 + K_3)}{Z_1(K_2 + 1) + Z_2} \quad (6)$$

Решение задач стоящих перед разработчиками высокотехнологичной электронной аппаратуры в условиях появления новой элементной базы требует создания новых схемотехнических методов проектирования. Одним из перспективных направлений является транскондуктивная реализация структурных схем усилительных устройств, на возможность которой было указано в [9]. Обсуждаемый ниже метод позволяет создавать схемы на современной элементной базе, коэффициент передачи которых будет идентичным коэффициенту передачи исходной структуры. Важно подчеркнуть,

что для метода транскондуктивной реализации пригодна любая структурная схема из множества разработанных к настоящему времени структур. Это позволяет реализовать удачные схемы минувших лет на новом технологическом уровне, предъявляя соответствующие требования к элементной базе.

**Транскондуктивный усилитель как базовый элемент электронной аппаратуры.** Транскондуктивный усилитель или просто транскондуктор является неидеальным источником тока, управляемым напряжением (ИТУН), и обладает следующими свойствами [10–13]: 1) входное и выходное сопротивления велики, в идеале стремятся к бесконечности; 2) имеет широкую полосу рабочих частот; 3) как правило, является регулируемым. Как и операционные усилители, транскондукторы строятся по дифференциальной схеме и могут обладать балансным выходом. Для транскондуктивной реализации структурных схем не используются дифференциальные входы и балансные выходы усилителей, поэтому они на рисунках не показаны.

Выходной ток  $I_{\text{вых}}$  связан с входным дифференциальным напряжением  $\Delta U_{\text{вх}}$  через передаточную проводимость усилителя  $G_m$  соотношением:

$$I_{\text{вых}} = G_m \Delta U_{\text{вх}} \quad (7)$$

В зависимости от способа включения транскондуктор может работать либо как усилитель (рис. 4,а и рис. 4,б), либо как резистор (рис. 4,в) [10, 11]. В отличие от обычных операционных усилителей напряжения транскондуктивные усилители способны устойчиво функционировать и обеспечивать высокий коэффициент усиления на частотах в сотни мегагерц. Транскондукторы позволяют реализовать высокоточные усилительные устройства полностью совместимые с МОП–технологией [12].

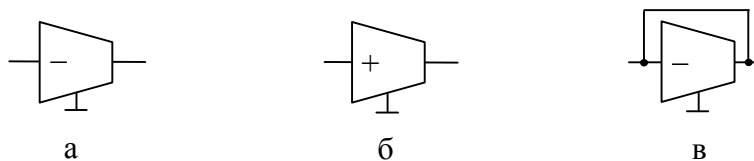


Рис. 4. Транскондуктивный усилитель

Первые усилители подобного типа появились в 1969 году [11]. Возможность применения транскондукторов в широком круге различных устройств дала толчок к проведению соответствующих работ в исследовательских центрах таких фирм, как Harris (<http://www.harris.com>), Linear Technology (<http://www.linear.com>), Burr–Brown (<http://www.burr-brown.com>). В результате появились устройства типа CA3080, CA3080A, CA3094 (Harris), LT1228 (Linear Technology), OPA660, (Burr–Brown) [10, 11].

Метод транскондуктивной реализации предполагает отображение структурной схемы устройства в виде сигнального графа Мейсона [3], и последующую изоморфную реализацию элементов соответственно включенными транскондукторами.

**Структурная схема и ее сигнальный граф.** Известно, что произвольную структурную схему электронного устройства можно отобразить с помощью сигнального графа Мейсона. Сигнальный граф представляет собой условное графическое изображение системы уравнений, представленной в причинно–следственной форме. Переменные системы уравнений (напряжения, токи) отображаются вершинами графа, а коэффициенты уравнений – дугами графа. Каждая дуга имеет направление и характеризуется коэффициентом передачи (весом дуги) [3]. Отображение структурных схем электрических цепей сигнальными графами является изоморфным, если в структурной схеме учтены блоки с единичными передачами (рис. 2). При этом передаточные функции структурной схемы (сигнального графа) легко получаются с помощью известной формулы Шеннона–Мейсона [3, 14], которой можно воспользоваться для проверки выражений (1)–(3).

В общем виде система уравнений сигнального графа имеет вид [15]

$$X = A X + B X_S \quad (8)$$

где  $X$  – вектор неизвестных переменных размерности  $n$ ,  $X_S$  – вектор известных переменных размерности  $m$ ,  $A = [a_{ij}]$  – матрица коэффициентов передачи дуг  $n \times n$ , и  $B = [b_{ij}]$  – матрица единичных коэффициентов передачи от источников  $n \times m$ .

В неявной форме выражение (8) представляется в виде

$$[\mathbf{1} - \mathbf{A}] \mathbf{X} = \mathbf{B} \mathbf{X}_S, \quad (9)$$

$\begin{matrix} n \times n & n \times 1 & n \times m & m \times 1 \end{matrix}$

где  $\mathbf{1}$  – единичная матрица.

Проиллюстрируем систему уравнений (8) в простейшем случае сигнального графа. На рис. 5,а изображена классическая структурная схема усилительного устройства Блэка с отрицательной обратной связью [5]. Здесь УП – усилительный преобразователь с коэффициентом усиления  $K$ , ОП – обратный преобразователь со стабильным коэффициентом передачи  $\beta < 1$ .

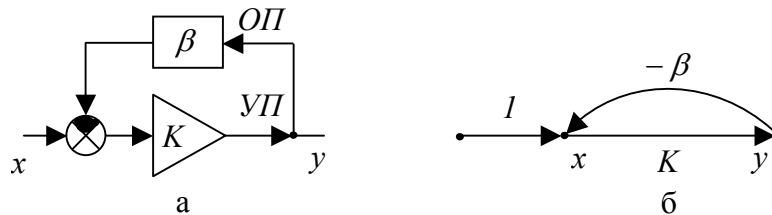


Рис. 5. Структурная схема усилителя Блэка с обратной связью и ее сигнальный граф

На рис. 5,б представлен сигнальный граф структурной схемы Блэка, при подаче на вход единичного напряжения для нахождения передаточной функции (переменные  $x$  и  $y$  также имеют размерность напряжения). Этот граф отображает следующую систему уравнений приведенных к причинно–следственной форме:

$$x = 1 - \beta \cdot y, \quad y = K \cdot x \quad (10)$$

или в матричном виде согласно системе (8):

$$\begin{bmatrix} 1 & \beta \\ -K & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Коэффициент передачи сигнального графа рис. 5,б согласно формуле Шеннона–Мейсона будет равен:  $S = K/(1 + K\beta)$ . Такой же результат дает решение системы уравнений (11) по правилу Крамера

$$y = \frac{\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -K & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \beta \\ -K & 1 \end{vmatrix}} = \frac{K}{1 + K\beta} \quad (12)$$

Очевидно, что отображение структурных схем электрических цепей матрицами с единицами на главной диагонали (9) позволяет применить для

анализа обычный матричный аппарат. Для транскондуктивной реализации структурных схем важно, что любую квадратную матрицу порядка  $n$ , можно представить в виде схемы замещения на ИТУН [16].

**Схемное отображение определителей матриц алгебраических дополнений.** Матрицу  $[1-A]$  в (9) можно отобразить схемой с  $n+1$  узлами [16]. Нумерация узлов схемы соответствует нумерации строк (столбцов) матрицы, а дополнительному узлу присвоен номер 0. Каждый диагональный элемент матрицы  $a_{ii}$  отображается на схеме ИТУН вида  $(i,0)(i,0)$ , где в первой паре скобок указаны узлы генератора ИТУН, а во второй – узлы приемника ИТУН. Ориентация генератора и приемника соответствует порядку следования номеров узлов пары. ИТУН вида  $(i,0)(i,0)$  эквивалентен проводимости, равной  $a_{ii}$ , включенной между узлами  $i$  и 0. Каждый недиагональный элемент матрицы отображается одним и только одним ИТУН, при этом элементу  $a_{ij}$  соответствует ИТУН вида  $(i,0)(j,0)$ . Значение параметра ИТУН считается равным значению отображаемого с помощью него элемента матрицы, которая может иметь произвольную физическую природу.

Подсоединение к схеме, отображающей матрицу, неудаляемого управляемого источника (НУИ), генератор которого включен между узлами  $i$  и 0, а приемник между узлами  $j$  и 0, соответствует удалению  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца матрицы. Это равносильно приданию элементу  $a_{ij}$  матрицы статуса неудаляемого элемента [17]. Такие элементы позволяют отображать дуги сигнального графа, имеющие веса, стремящиеся к бесконечности, то есть задающие идеальные операционные усилители – НУИ. Для выделения (стягивания) НУИ используется формула [18, 19]

$$\Delta = \pm \Delta_n \quad (13)$$

где  $\Delta_n$  – определитель схемы, полученной из первоначальной схемы в результате следующих преобразований: 1) стягивания генератора (приемника) выделяемого НУИ таким образом, чтобы генераторы (приемники), которые инцидентны одному из узлов – опорному узлу этого генератора (приемника), переключились на другой его узел; 2) объединения опорных узлов выделяемого



НУИ. Для раскрытия алгебраических дополнений матриц важно, чтобы объединенному узлу полученной схемы был присвоен номер опорного узла генератора НУИ. Положительный (отрицательный) знак перед  $\Delta_n$  выбирается в случае противоположной (одинаковой) ориентации генератора и приемника в первоначальной схеме по отношению к опорным узлам выделяемого НУИ.

Если в качестве опорного узла используется общий узел генератора и приемника выделяемого НУИ, то преобразование 2 в операции стягивания опускается, а данное выше правило выбора знака инвертируется, то есть знак перед  $\Delta_n$  считается положительным (отрицательным) при одинаковой (противоположной) ориентации генератора и приемника соответствующего НУИ по отношению к общему опорному узлу в первоначальной схеме. При раскрытии алгебраических дополнений матриц необходимо, чтобы узел с номером 0 не использовался в качестве опорного узла выделяемых НУИ.

Случаи нахождения симметричного и несимметричного алгебраического дополнения матрицы второго порядка показаны на рис. 6 и рис. 7. В первом случае генератор и приемник НУИ параллельны, а в качестве опорного узла используется их общий узел с номером 0, и определитель соответствующей схемы берется с положительным знаком. Во втором случае в качестве опорных узлов используются различные узлы генератора и приемника НУИ, поэтому определитель соответствующей схемы берется с отрицательным знаком.

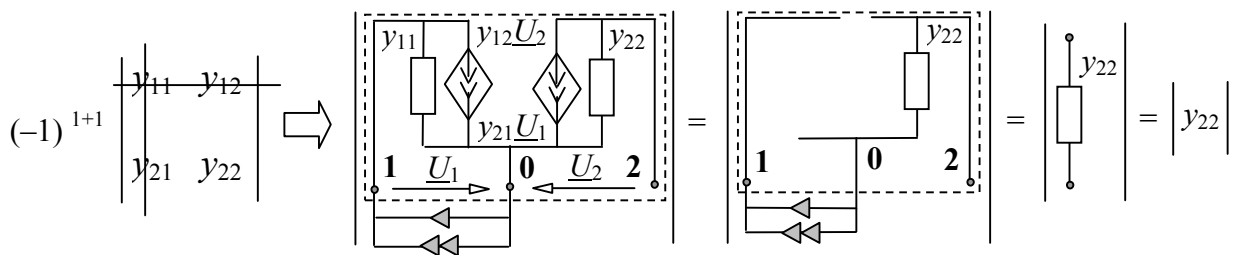


Рис. 6. Получение алгебраического дополнения  $\Delta_{11}$  для матрицы второго порядка

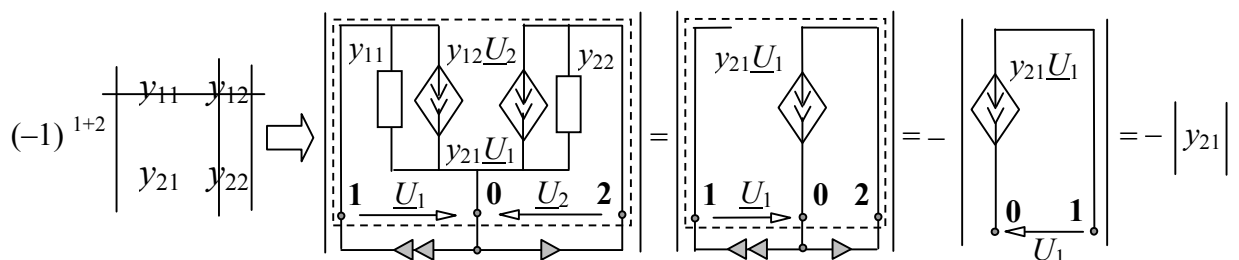


Рис. 7. Получение алгебраического дополнения  $\Delta_{12}$  для матрицы второго порядка

Нахождение однократных алгебраических дополнений матриц более высокого порядка выполняется аналогично. На рис. 8 и рис. 9 рассмотрено получение положительного и отрицательного алгебраических дополнений матрицы третьего порядка. Отметим, что в ходе преобразований узел генератора НУИ (узел 3 на рис. 8, узел 2 на рис. 9) становится новым объединенным узлом.

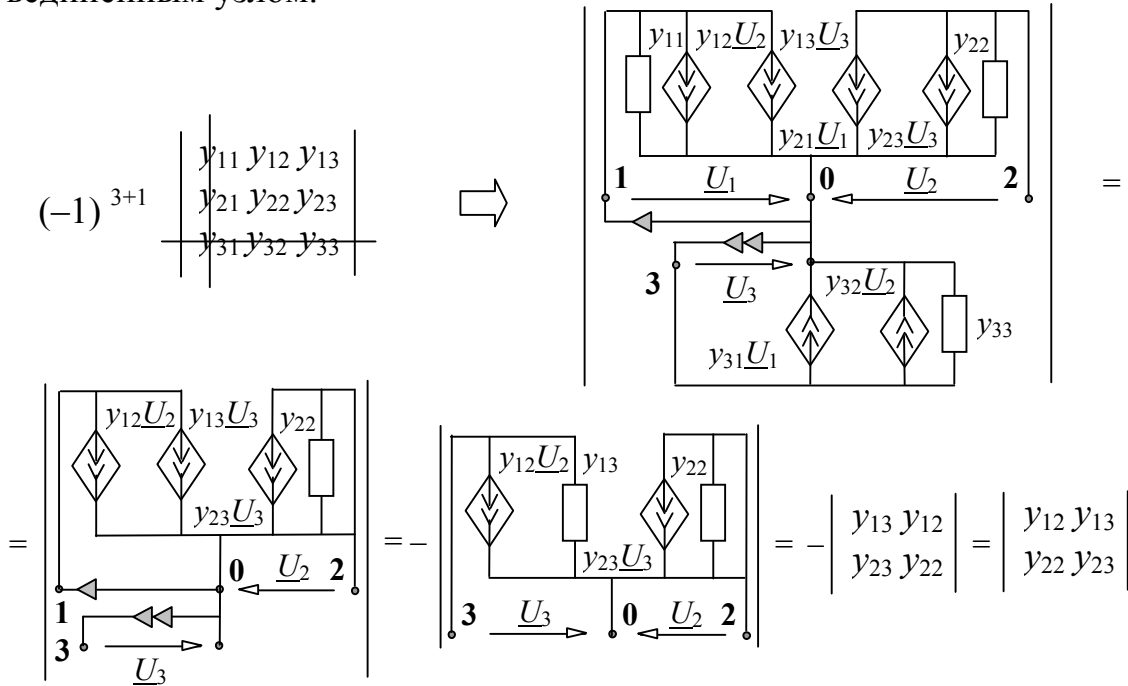


Рис. 8. Получение алгебраического дополнения  $\Delta_{31}$  для матрицы третьего порядка

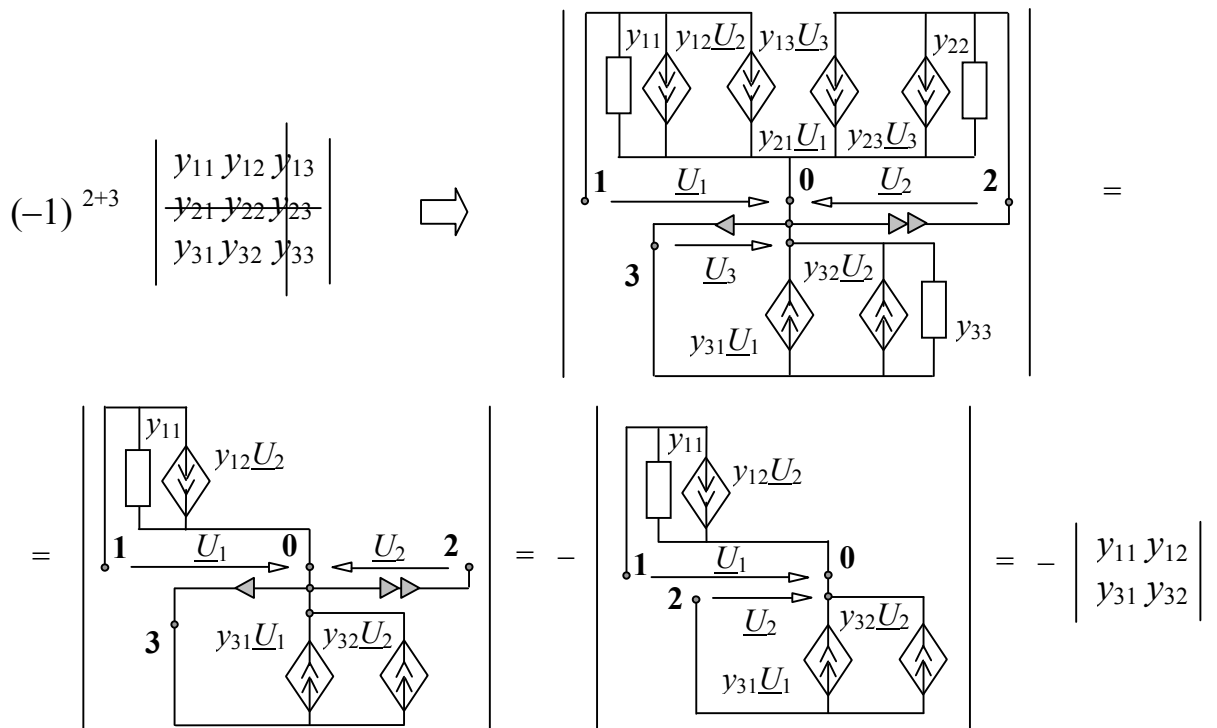


Рис. 9. Получение алгебраического дополнения  $\Delta_{23}$  для матрицы третьего порядка

$N$ -кратные алгебраические дополнения, раскрытие которых требуется при наличии  $N$  неудаляемых элементов в матрице (неудаляемых дуг в графе), получают подсоединением к схеме, отображающей матрицу без неудаляемых элементов,  $N$  НУИ. Генератор и приемник, соответствующие каждому НУИ имеют одинаковые номера. Узел с номером 0 обязательно является общим узлом подсоединяемых генератора и приемника НУИ, но не используется в качестве опорного узла при выделении НУИ.

Для иллюстрации схемного отображения матрицы приведем решение системы (11), раскрывая определители выражения (12) в схемно-алгебраическом виде

$$y = \frac{\begin{vmatrix} I & & & \\ & \downarrow & & \\ & & -KU_x & \\ & & & \downarrow \\ U_x & & & U_y \\ & & & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} I & & & \\ & \downarrow & & \\ & & \beta U_y & \\ & & & \downarrow \\ U_x & & & U_y \\ & & & 0 \end{vmatrix}} = \frac{\begin{vmatrix} I & & & \\ & \downarrow & & \\ & & -K & \\ & & & \downarrow \\ & & & I \end{vmatrix}}{1 \cdot 1 + \begin{vmatrix} \beta & & & \\ & \downarrow & & \\ & & -K & \\ & & & \downarrow \\ & & & \beta \end{vmatrix}} = \frac{(-1) \begin{vmatrix} I & & & \\ & \downarrow & & \\ & & 1 & \\ & & & \downarrow \\ & & & -K \end{vmatrix}}{1 + (-1) \begin{vmatrix} \beta & & & \\ & \downarrow & & \\ & & -K & \\ & & & \downarrow \\ & & & \beta \end{vmatrix}} = \frac{K}{1 + K\beta} \quad (14)$$

Было бы желательно решить систему уравнений в символьном виде, минуя использование правила Крамера, на основе ее представления электрической цепью.

**Схемное отображение системы уравнений.** Обратим внимание на то, что элемент  $a_{12}$  в матрице числителя (12) имеет статус неудаляемого элемента, поскольку его удаление приводит к вырождению матрицы. Этому элементу в числителе выражения (14) соответствует ИТУН  $1U_y$ , который фактически является НУИ (удаление ИТУН  $1U_y$  приводит к вырождению схемы числителя). Покажем, что нахождение  $y$  по правилу Крамера в (14) соответствует нахождению  $U$  в схеме рис. 10,а ( $U=y, J=1$ ). Для схемы рис. 10,а на основе

метода схемных определителей [20] символьное выражение отклика находится по формуле:

$$U = (\Delta N / \Delta D) J \quad (15)$$

где  $\Delta N$ ,  $\Delta D$  – определители схем, отображающих числитель и знаменатель соответственно.

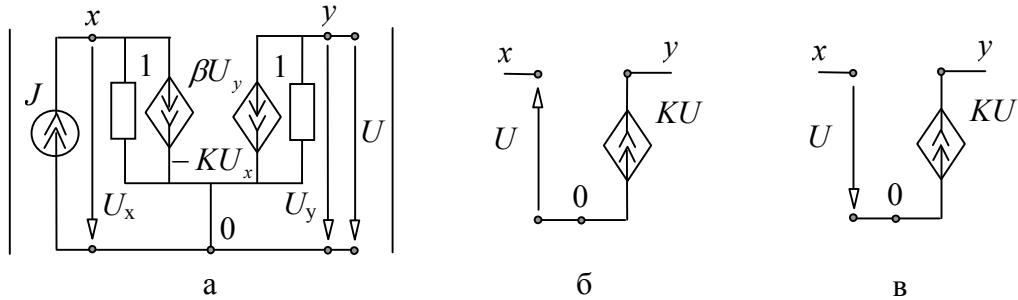


Рис. 10. Отображение системы (11) (а), инвертирующего усилителя (б), неинвертирующего усилителя (в)

Определим  $\Delta N$  для схемы на рис. 10,а.

$$\Delta N = \left| \begin{array}{ccc} \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 0 & 1 & \beta U_y \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ U_x & -KU_x & U_y \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 0 & 1 & 0 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{ccc} \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 0 & -K & 0 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ -K & 0 & 0 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 0 & 0 & -K \end{array} \right| = (-1) \left| \begin{array}{ccc} \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 0 & -K & 0 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 0 & 0 & -K \end{array} \right| = K \quad (16)$$

Поскольку знаменатели выражений (14) и (15) являются определителями одной и той же схемы, то  $y = U = K / (1 + K\beta)$ .

В общем случае, каждый ненулевой  $i$ -й элемент вектора  $BX_s$  в системе уравнений (9) отображается на схеме источником тока вида  $(0, i)$ , то есть направленным от узла  $0$  к узлу  $i$ . Приёмник с искомым напряжением направлен от соответствующего узла к узлу с номером  $0$ .

Таким образом, схемное отображение системы уравнений, позволяя избежать применения правила Крамера, обеспечивает ее решение в аналоговом виде. В качестве моделирующего элемента используются не операционные усилители, как в традиционном аналоговом моделировании [21], а транскондукторы.

**Транскондуктивная реализация структурной схемы (сигнального графа).** Для аппаратурной реализации схемы рис. 10,а потребуются два типа усилителя – инвертирующий (рис. 10,б) и неинвертирующий (рис. 10,в). Отображение диагональных элементов матрицы на схеме требует инвертирующих усилителей, исходя из заданной ориентации генераторов и приёмников напряжения (рис. 10,б).

Отображение систем уравнений (9), а значит, и сигнального графа, отличается сменой знака у элементов, лежащих вне главной диагонали. Следовательно, дуги с положительными весами отображаются неинвертирующими усилителями, дуги с отрицательными весами – инвертирующими усилителями, а диагональные элементы – резисторами построенными путём замыкания входов и выходов инвертирующих усилителей.


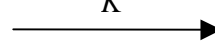
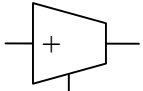
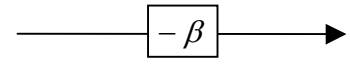
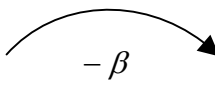
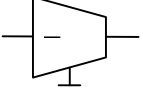


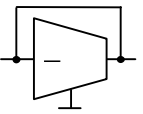
Таким образом, появляется возможность представить структурную схему усилительного устройства непосредственно, минуя отображение матрицей, в виде схемы на ИТУН, а значит, с появлением некоторой погрешности вследствие неидеальности, и на транскондукторах.

Схемное отображение системы уравнений предполагает, что транскондуктивная реализация подключается к источнику тока. Для получения потенциальных схем, соответствующих схемам на рис. 3,а–в, необходимо воспользоваться эквивалентным преобразованием источника тока к источнику ЭДС, что в случае транскондуктивной реализации приводит к появлению нового входного узла, к которому последовательно подключается проводимость, – транскондуктор, реализованный как единичная проводимость.

Элементы сигнального графа последовательно реализуются соответственно включенными транскондуктивными усилителями в соответствии с табл. 1, согласно следующему алгоритму: 1) проставляются основные узлы, соответствующие вершинам сигнального графа; 2) помещается новый входной узел, обусловленный преобразованием источника тока к источнику ЭДС; 3) между входным узлом и новым входным узлом последовательно включается транскондуктивный усилитель, реализованный

как единичная проводимость (рис. 4,в); 4) устанавливаются неинвертирующие транскондукторы соответствующие дугам сигнального графа с положительными параметрами (рис. 4,б); 5) устанавливаются инвертирующие транскондукторы соответствующие дугам сигнального графа с отрицательными параметрами (рис. 4,а); 6) между основными узлами (за исключением входного) и базисными узлами включаются транскондукторы реализованные как проводимости соответствующие условным единичным петлям сигнального графа (рис. 4,в).

Таблица 1. Транскондуктивная реализация элементов сигнального графа и структурных схем

Элементы структурной схемы	Элементы сигнального графа	Реализация на транскондуктивных усилителях
	Дуга с положительным параметром 	Неинвертирующий усилитель 
Цепь обратной связи 	Дуга с отрицательным параметром 	Инвертирующий усилитель 
Сумматор или узел 	Вершина (узел) 	Резистор 

Воспользовавшись приведенным алгоритмом, выполним транскондуктивную реализацию структурной схемы Блэка (рис. 5,а). Результат реализации представлен на рис. 11, где  $G_{m1} = K$ ,  $G_{m2} = -\beta$ ,  $G_{m3} = 1$ .

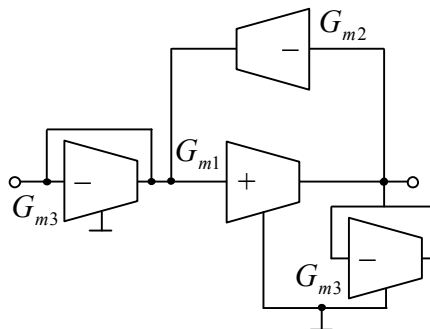


Рис. 11. Транскондуктивная реализация структурной схемы Блэка с обратной связью

**Примеры транскондуктивной реализации.** Рассмотрим структурные схемы усилительных устройств на рис. 1,а–в. Представим эти схемы в виде сигнальных графов, как это показано на рис. 12,а–в. На рис. 12,а и рис. 12,б учтено, что структурные схемы на рис. 1,а и рис. 1,б содержат блок передачи, коэффициент которого равен единице (рис. 2,а и рис. 2,б).

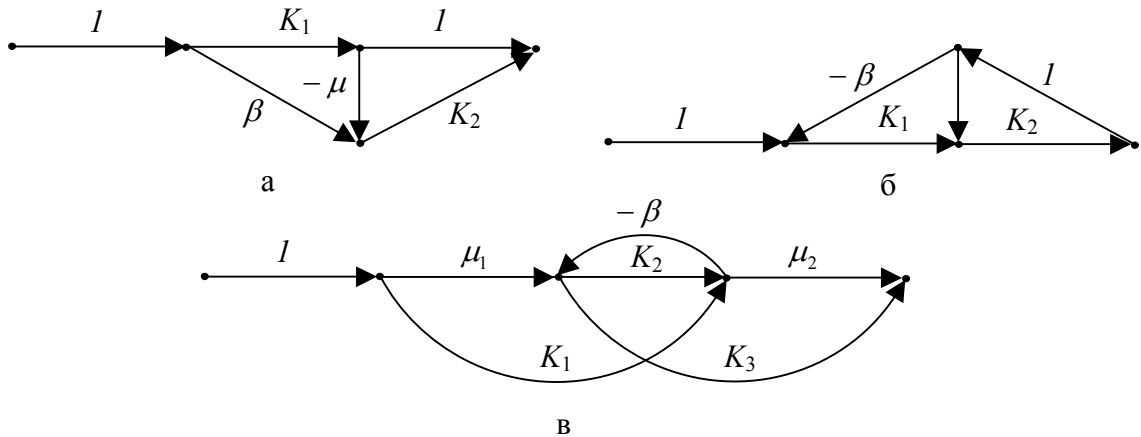


Рис. 12. Сигнальные графы усилителей

Этап отображения структурной схемы в виде сигнального графа в методе транскондуктивной реализации является промежуточным и необходимым, прежде всего, для понимания предлагаемого метода. Для построения схемы на транскондуктивных усилителях достаточно самой структурной схемы, элементы которой напрямую реализуются соответственно включенными транскондукторами согласно табл. 1.

На рис. 13,а–в представлены транскондуктивные реализации структурных схем усилителей на рис. 1,а–в. Найдём коэффициенты передачи реализованных схем, используя метод схемных определителей [20] или программу SCAD [8], и сравним результат с коэффициентами усиления исходных структур.

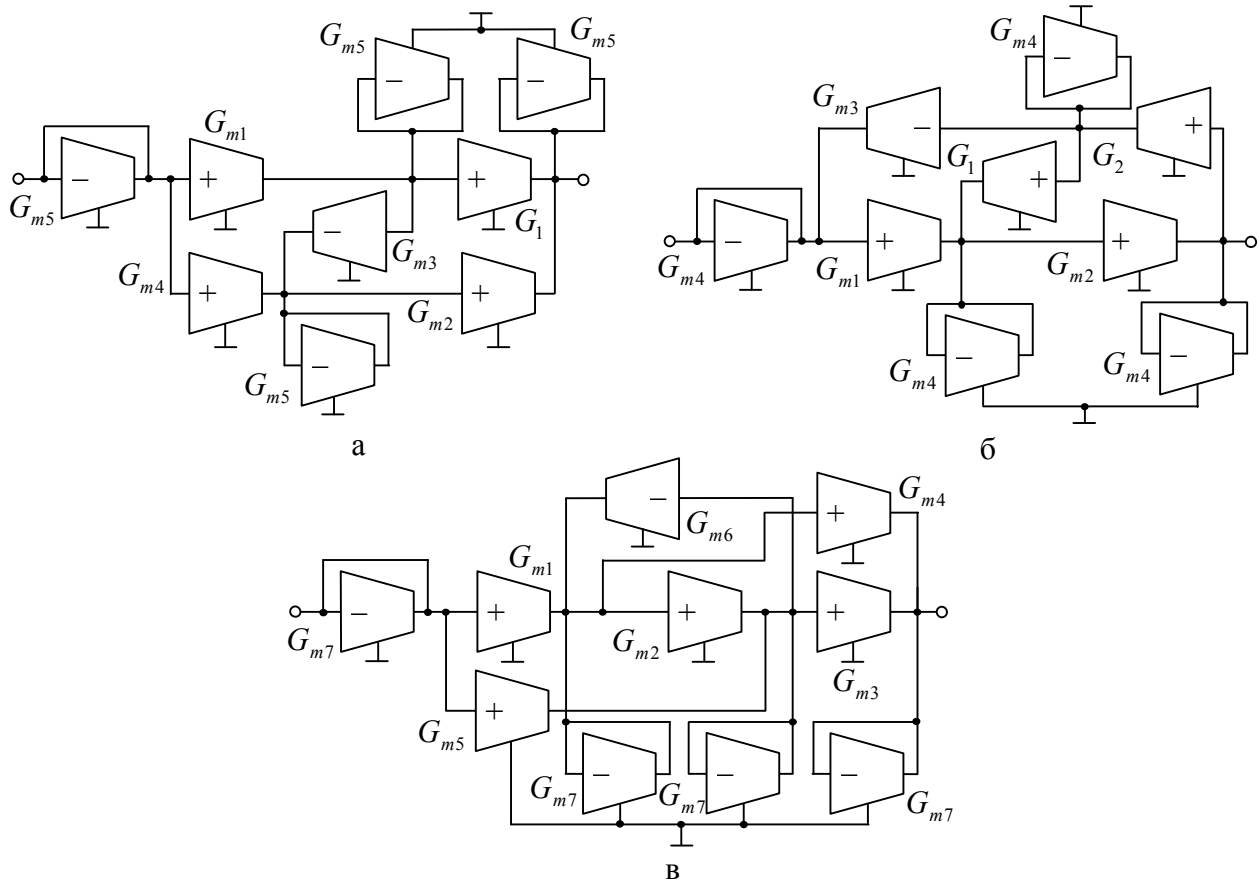


Рис. 13. Транскондуктивная реализация структурных схем усилителей

Для схем на рис. 13,а–в получаем соответственно:

$$U = \frac{G_1 \cdot G_{m1} \cdot G_{m5} \cdot G_{m5} + G_{m2} \left( (G_{m4} \cdot G_{m5} - G_{m1} \cdot G_{m3}) G_{m5} \right)}{G_{m5} (G_{m5} (G_{m5} \cdot G_{m5}))}, \quad (16)$$

где  $G_{m1} = K_1$ ,  $G_{m2} = K_2$ ,  $G_{m3} = \mu$ ,  $G_{m4} = \beta$ ,  $G_{m5} = g = 1$ ,  $G_1 = 1$ ;

$$U = \frac{G_{m1} \cdot G_{m2} \cdot G_{m4}}{G_2 \cdot G_{m1} \cdot G_{m2} \cdot G_{m3} - G_1 \cdot G_2 \cdot G_{m2} G_{m4} + G_{m4} (G_{m4} (G_{m4} \cdot G_{m4}))}, \quad (17)$$

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

$$U = \frac{G_{m5} \left( (G_{m7} \cdot G_{m7} + G_{m2} \cdot G_{m4}) G_{m7} \right) + G_{m3} \left( (G_{m4} \cdot G_{m7} - G_{m6} \cdot G_{m1}) G_{m7} \right)}{G_{m2} \left( (G_{m7}) (G_{m7} \cdot G_{m6}) \right) + (G_{m7}) \left( (G_{m7}) (G_{m7} \cdot G_{m7}) \right)}, \quad (18)$$

где  $G_{m1} = K_1$ ,  $G_{m2} = K_2$ ,  $G_{m3} = K_3$ ,  $G_{m4} = \mu_1$ ,  $G_{m5} = \mu_2$ ,  $G_{m6} = \beta$ ,  $G_{m7} = g = 1$ .

Полученные выражения (16)–(18) совпадают с формулами (1)–(3) для коэффициентов передачи усилителей на рис. 1,а–в.



## Выводы

1. Предложенный метод обеспечивает реализацию структурных схем на новой элементной базе – транскондуктивных усилителях, даруя «вторую жизнь» многим удачным структурным схемам минувших лет.

2. В отличие от традиционных методов, метод позволяет получить коэффициент передачи схемы на транскондукторах, полностью идентичный коэффициенту передачи исходной структурной схемы, без применения условий настройки.

3. Отображение элементов матрицы и вектора правой части схемами на транскондуктивных усилителях позволяет решать системы линейных алгебраических уравнений произвольной физической природы, как в цифровом, так и в аналоговом виде.

## Литература

1. Петров Б. Н. О построении и преобразовании структурных схем. – Известия ОТН АН СССР. – 1945. – № 12. – С. 1146–1162.

2. Stout T. M. A block–diagram approach to network analysis // Trans AIEE. – Pt. II: Application and Industry. – 1952. – Vol. 71. – P. 255–260.

3. Мэзон С. Дж., Циммерман Г. Электрические цепи, сигналы и системы. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 620 с.

4. Волгин Л.И. Топологические преобразования и синтез схем радиоэлектронных средств. – Тольятти: Изд-во Поволжского технологического ин-та сервиса. – 2000. – 173 с.

5. Волгин Л. И. Топологические модели усилителей электрических сигналов. – Тольятти: Поволжский технологический ин-т сервиса, –2002. – 90 с.

6. Black H. S. Патент США №1686792. – 1928.

7. Волгин Л. И. Измерительный усилитель с аддитивной коррекцией // Измерительная техника. – 1978. – № 10. – С. 52–53.

8. Горшков К. С. Разработка и реализация интернет–сайта "Символьный анализ и диагностика электронных цепей" // Схемно–алгебраические модели

активных электрических цепей: Тр. международ. конф. КЛИН–2005. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – Т. 3. – С. 41–46.

9. Волгин Л. И., Горшков К. С., Филаретов В. В. Реализация структурных схем высокостабильных усилительных устройств на базе транскондуктивных усилителей. // Схемно–алгебраические модели активных электрических цепей: Тр. международ. конф. КЛИН–2006. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – Т. 3. – С. 28–37.

10. Коротков А. С. Микроэлектронные аналоговые фильтры на преобразователях импеданса. – СПб.: Наука, 1999. – 416 с.

11. Фурман И. И. Широкополосные операционные усилители типа "ОТА" // Электронные компоненты. – 1999. – №4. – С. 61–62.

12. Yao L, Steyaert M., and Sansen W. Fast–settling CMOS two–stage operational transconductance amplifiers and their systematic design // Proc. of the international symposium on circuits and systems (ISCAS–2002). – Vol. 2 (May). – P. 839–842.

13. Korotkov A. S., Morozov D. V. Transconductance amplifier with low–power consumption // IEEE Trans. on circuits and systems–II: Express briefs. – 2. – 2005. – Vol.52, N 11. – P. 776–779.

14. Шакиров М. А., Кияткин Р. П., Королева Т. И., Филаретов В. В. Сигнальные графы электрических цепей: Учеб. пособие. – Л.: Ленингр. гос. техн. ун–т., Ленинград, 1991. – 77 с.

15. Lin P.M., Symbolic Network Analysis. – Elsevier: Amsterdam–Oxford–New York–Tokyo, 1991. – 319 p.

16. Филаретов В. В. Схемное отображение матрицы для символьного решения систем линейных алгебраических уравнений // Логико–алгебраические методы, модели, прикладные применения: Тр. международ. конф. КЛИН–2001. – Ульяновск: УлГТУ, 2001. – Т. 3. – С. 13–15.

17. Филаретов В. В. О взаимосвязи схемного и матричного определителей // Системы искусственного интеллекта: алгоритмы обработки и модели: Тр. международ. конф. КЛИН–2002. – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – Т. 4. – С. 85–93.

18. Филаретов В. В. Формирование символьных функций для активных электрических цепей методом стягивания и удаления ветвей // Электричество.– 2001.– № 4.– С. 43–51.

19. Filaretov V. V., Korotkov A. S. Generalized Parameter Extraction Method in Symbolic Network Analysis // European conference on circuit theory and design (ECCTD–2003). – Krakow.– 2003.– Vol. 2.– P. 406–409.

20. Курганов С. А., Филаретов В. В. Схемно–алгебраический анализ, диакоптика и диагностика линейных электрических цепей: Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ.– 2005.– 320 с.

21. Тетельбаум И.М., Шнейдер Ю.Р. Практика аналогового моделирования динамических систем: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1987.–384 с.

*Горшков Константин Сергеевич – окончил радиотехнический факультет Ульяновского государственного технического университета (УГТУ) по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств». Ассистент кафедры «Электроснабжение» УГТУ.*

*Филаретов Владимир Валентинович – окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института (ныне УГТУ) по специальности «Радиотехника». В 2002 г. защитил докторскую диссертацию «Топологический анализ электрических цепей на основе схемного подхода» в Московском энергетическом институте (техническом университете). Профессор кафедры «Электроснабжение» УГТУ.*

Авторы:

К. С. Горшков

В. В. Филаретов

Дата: 8.09.2007