# Символьный анализ электрических цепей с нуллорными и зеркальными аномальными элементами

## КУРГАНОВ С.А, ФИЛАРЕТОВ В.В.

Предложен метод безызбыточного топологического анализа электрических цепей со всеми известными аномальными элементами: двумя нуллорными (нуллатор и норатор) и двумя зеркальными (зеркало напряжения и зеркало тока). Определитель схемы с зеркальным элементом представляется как сумма определителей двух модификаций исходной схемы. Установлено, что существование контуров с четным числом зеркальных элементов влечет вырождение схемы.

Ключевые слова: символьный анализ, аномальный элемент, нуллор, зеркала напряжения и тока, схемный определитель, схемная функция

Символьные схемные функции электрических цепей с аномальными нуллорными и зеркальными элементами широко применяются при анализе и синтезе аналоговых фильтров и генераторов с токовыми конвейерами и операционными усилителями [1-3]. Аномальные элементы учитываются в модифицированном методе узловых напряжений путем сложения или вычитания строк и столбцов исходной матрицы проводимости [1, 3, 4]. Определитель матрицы проводимости содержит многочисленные взаимно уничтожающиеся слагаемые, поскольку каждая незаземленная проводимость входит в узловую матрицу четыре раза - по два с положительным и отрицательным знаконами, что делает трудоемким переход к выражениям в окончательном виде.

На избыточность матриц электрических цепей обратил внимание Кирхгоф, который предложил топологический метод анализа, использующий непосредственно схему замещения [5]. Для анализа активных электрических цепей разработан метод выделения параметров на основе схемных определителей, который позволяет получать символьные функции без избыточных слагаемых и в компактной форме [6]. При этом используются не обычные [1], а направленные и нумерованные нуллорные элементы (рис. 1, a и  $\delta$ ).

We propose a method for carrying out non-redundant topological analysis of electric circuits with all known abnormal elements, two nullor elements (a nullator and a nolator), and two mirror elements (a voltage mirror and a current mirror). The determinant of the circuit with a mirror element is represented as the sum of determinants of two initial circuit modifications. It is found that the existence of loops having an even number of mirror elements entails degeneration of the circuit.

Key words: symbolic analysis, abnormal element, nullor, voltage and current mirrors, circuit determinant, circuit function

Зеркальные аномальные элементы напряжения (ЗЭН) и тока (ЗЭТ) (рис. 1, в и г слева) могут быть представлены схемами замещения с нуллорными элементами и единичными сопротивлениями (рис. 1, в и г справа) [7].

Норатор и нуллатор образуют нуллорный идеальный элемент – нуллор, а соединение ЗЭН и ЗЭТ (объединение пары их узлов) - зеркальный идеальный элемент, соответствующий токовому конвейеру ICCII+ [1, рис. 6, f]. Эквивалентная схема токового конвейера состоит из двух повторителей («зеркал»): повторителя тока и инверсного повторителя напряжения (откуда и происхождение термина «зеркальный»). Гибридные зеркальные идеальные элементы, образованные парами: ЗЭН+норатор или нуллатор+ЗЭТ, также широко используются в моделях электронных компонентов [2, 3].

Методики анализа на основе схемных определителей [7, 8] не предусматривают выделения зеркальных элементов в случаях, отличных от последовательного и параллельного соединения элементов. До сих пор не исследованы вопросы образования специфических взаимно уничтожающихся слагаемых, порожденных структурными особенностями схем с зеркальными аномальными элементами. Целью статьи является получение безызбыточных



Рис. 1. Направленные нумерованные нуллатор (а), норатор (б), ЗЭН (в) и ЗЭТ (г)

формул выделения параметров для схем, содержащих как нуллорные, так и зеркальные аномальные элементы.

Формулы выделения зеркальных элементов. Искомые схемно-алгебраические формулы выделения ЗЭН и ЗЭТ получаются на основе нуллорных схем замещения (рис. 1, в и г справа), подключаемых к произвольной подсхеме. Определитель такой схемы, например для ЗЭН, после выделения одной

из проводимостей по формуле Фойснера [6] приобретает следующий вид:



Искомая формула выделения ЗЭН получается из (1) в результате: удаления проводимости, параллельной норатору; взаимной замены номеров у двух нуллаторов; изменения направления нуллатора; удаления двух последовательных соединений одноименных норатора и нуллатора; стягивания проводимости, последовательной с нуллатором [6]. Аналогично выводится формула выделения ЗЭТ. Обе формулы представлены ниже:

где в каждом слагаемом – схемном миноре, нуллатор или норатор имеет тот же номер, что и ЗЭН или ЗЭТ соответственно.

Формула (2) по структуре соответствует схемно-алгебраическому тождеству [9], отображающему нахождение незаземленного отклика в виде разности двух узловых напряжений:

$$\left| \overbrace{\bullet \bullet \bullet} \right| = \left| \overbrace{\bullet} \bullet \right| + \left| \overbrace{\bullet \bullet} \bullet \right|. \tag{4}$$

Множества слагаемых числителей узловых напряжений в (4) образуют пересечение. При вычитании (за счет различного направления нуллаторов по отношению к базисному узлу) происходит взаимное уничтожение общих слагаемых рассматриваемых определителей. В формуле (2) нуллаторы имеют одно направление, поэтому одинаковые по модулю слагаемые не уничтожаются взаимно, а удваиваются. В силу дуальности формула (3) также не содержит взаимно уничтожающихся слагаемых.

Частные случаи выделения зеркальных элементов. Частные формулы упрощения схемных определителей с ЗЭН и ЗЭТ доказываются с помощью общих формул (2) или (3) и позволяют ускорить анализ схем с зеркальными элементами.



Структурные вырождения схем с зеркальными элементами. Применяя формулу (2) к схеме, имеющей ЗЭН-контур, получаем



В правой части (5) остается только два ненулевых слагаемых, поскольку ЗЭН имеют попарно общие полюсы и пара соседних ЗЭН приводит к параллельному соединению нуллаторов.

Схемные миноры в (5) равны по модулю, поскольку их схемы различаются только номерами нуллаторов. При нечетном и четном числе n элементов в контуре они имеют одинаковые и противоположные знаки соответственно, так как число перестановок номеров нуллаторов на единицу меньше числа n В результате при нечетном числе n определитель схемы (5) равен удвоенному выражению первого или второго схемного минора, а при четном n определитель (5) равен нулю. Отсюда при v=2k+1



Контуры ЗЭТ учитываются по аналогичной формуле

$$D = \left| \begin{array}{c} & & & & & \\ \hline \beta_1 & & & & \\ \hline \beta_2 & & & & \\ \hline \beta_2 & & & & \\ \hline \beta_{\nu-1} & & & \\ \hline \beta_{\nu-1} & & & \\ \hline \beta_{\nu} & & \\ \hline \beta_{\nu} & & \\ \hline \end{array} \right| =$$

$$= 2 \left| \begin{array}{c} & & & \\ \hline \beta_1 & & & \\ \hline \beta_2 & \beta_3 & & \\ \hline \beta_{\nu-1} & & \\ \hline \beta_{\nu-1} & & \\ \hline \end{array} \right| .$$
(7)

При v=2k D=0 как для ЗЭН-, так и для ЗЭТ-контуров, где k=0, 1, 2,...

Свойства ЗЭН- или ЗЭТ-контуров не нарушаются при наличии в них произвольного числа нуллаторов или нораторов соответственно. Формулы (6) и (7) необходимо использовать для исключения взаимно уничтожающихся (при четных контурах) и непосредственного выделения удвоенных (при нечетных контурах) слагаемых.

**Пример символьного анализа фильтра нижних частот на базе зеркальных элементов.** Схема фильтра показана на рис. 2,*а* [3].

В схеме на рис. 2,6 для нахождения знаменателя ( $\underline{E} = \underline{U} = 0$  все резисторы заданы проводимостями (первая буква *g*), а емкостные проводимости имеют вид:  $y_1 = pC_1$ ,  $y_{1a} = pC_{1a}$ ,  $y_2 = pC_2$ ,  $y_{2a} = pC_{2a}$  (*p* – комплексная частота). Требуется найти комплексный коэффициент передачи напряжения:

$$\underline{K} = \underline{U} / \underline{E} = N / D. \tag{8}$$

При стягивании  $g_b$  в схеме знаменателя проводимость  $g_a$  может быть удалена как входящая в четный ЗЭТ-контур. Образованный нечетный ЗЭН-контур выделяется по формуле (6). При этом проводимость g оказывается параллельной введенному нуллатору. После удаления  $g_b$  выделяется проводимость g, при удалении которой образуется вырождающее схему сечение из ЗЭТ и норатора. Образованные последовательные соединения ЗЭТ-нуллатор и ЗЭН-ЗЭТ удаляются в соответствии с формулами из строк 3 и 4 в таблице. Таким образом,



В первом определителе формулы (9) выделяются одновременно проводимости  $g_{m1}$  и  $g_{m2}$ . Определитель схемы будет равен нулю как при одновременном стягивании проводимостей  $g_{m1}$  и  $g_{m2}$  (образуется четный контур из ЗЭТ), так и при удалении этих проводимостей (размыкается нуллатор 3). Ненулевые слагаемые образуются: 1) при удалении



**Рис. 2.** Схема фильтра нижних частот на базе аномальных элементов 1–6 (*a*); схема для нахождения знаменателя коэффициента передачи напряжения (б)

 $g_{m1}$  и стягивании  $g_{m2}$ ; 2) при удалении  $g_{m2}$  и стягивании  $g_{m1}$ .

Во втором определителе формулы (9) заземленный ЗЭТ с номером 2 замещается норатором (строка 5 в таблице). Удаляются проводимости  $g_{ap}$  и  $g_{an}$ , параллельные нораторам с номерами 2 и 1, а также два последовательных соединения норатора и нуллатора с номерами 1 (с изменением знака на противоположный) и 2. В результате формула (9) преобразуется к следующему виду:

$$D = 2 g_b \left[ g_{m1} \right| \underbrace{1 + 2}_{y_1} \left| + g_{m2} \right| \underbrace{1 + 1}_{g_{m1}} \right| \right] -$$

$$-g \left[ \begin{array}{c} I \\ g_1 \\ g_2 \\ g_{1a} \\ g_{1a} \\ g_{2a} \\ g_{2a} \\ g_{m2} \\ g$$

где прямоугольником обозначена схема в первом определителе формулы (9) без проводимостей $g_{m1}$  и  $g_{m2}$ .

В первом определителе формулы (10) выделяем подсхему из проводимостей  $g_1$ ,  $y_1$ ,  $g_2$ ,  $y_2$  (с заливкой в (9)) путем деления схемы по двум узлам 3 и 0 [6]. Ненулевой параметр второй подсхемы, получаемый при объединении узлов 3 и 0, равен  $y_{1a}g_{2a}g_{an}$ . Второй определитель из формулы (10) раскрывается подобно первому определителю — выделяется подсхема из проводимостей  $g_{1a}$ ,  $y_{1a}$ ,  $g_{2a}$ ,  $y_{2a}$ . Ненулевой параметр второй подсхемы, получаемый при объединении узлов 4 и 0, равен  $y_1g_2g_{an}$ .

Третий определитель в (10) раскрывается делением схемы на две подсхемы по трем узлам: 5, 6 и 0 [6]. При этом первой подсхемой считается трехполюсник III, а вторая подсхема состоит из двухполюсников I и II. Определители двухполюсников I и II уже найдены при раскрытии первого и второго определителей из формулы (10). Единственный ненулевой параметр трехполюсника III является его определителем и равен  $g_a(g_{m1} + g_{m2}) +$  $+ g_{m1}g_{m2}$ .

Таким образом,

$$D = 2g_b \{g_{m1}y_{1a}g_{2a}g_{an}[(g_1 + y_1)(g_2 + y_2) + g_2y_2] + g_{m2}y_{1}g_2g_{ap}[(g_{1a} + y_{1a})(g_{2a} + y_{2a}) + g_{2a}y_{2a}] \} - g[(g_{1a} + y_{1a})(g_{2a} + y_{2a}) + g_{2a}y_{2a}][(g_1 + y_1)(g_2 + g_{2a}y_{2a})] + g_{2a}g_{2a}g_{2a}[(g_1 + g_{m2}) + g_{m1}g_{m2}] \}.$$
(11)

Схема для нахождения числителя N коэффициента передачи напряжения (8) получается из схемы на рис. 2, *a* путем замены источника ЭДС <u>*E*</u> и приемника напряжения <u>*U*</u> норатором и нуллатором соответственно [6]. Из полученной схемы символьное выражение числителя находится аналогично знаменателю на основе формулы выделения нечетного контура из ЗЭН. Отсюда

$$N = -2g_1g_2g_bg_{ap}[(g_{1a} + y_{1a})(g_{2a} + y_{2a}) + g_{2a}y_{2a}]'$$
$$(g_{m1} + g_{m2}).$$
(12)

Как видно, выражения (11) и (12) требуют минимального числа операций при отсутствии взаимно уничтожающихся слагаемых. Эти выражения совпадают с выражениями, полученными с помощью программы символьного анализа электронных схем CirSym [8], разработанной В.В.Филаретовым, в которой реализованы формулы (2), (3), (6) и (7). В системе Maple-17 [10] эквивалентное безызбыточное и компактно свернутое выражение получается из матричного определителя путем трудоемкого развертывания, приведения подобных членов и разложения на множители с помощью операции simplify('size').

Сравнение избыточных определителей исследуемого фильтра, полученных путем разложения узловой матрицы. Матрица узловых проводимостей для схемы фильтра на рис. 2,*а* имеет 9-й порядок, в которой ненулевые элементы принимают следующие значения [3]:

$$y_{11} = 1; \ y_{21} = -g_1; \ y_{22} = g_1 + g_2 + p*c_1; \ y_{23} = -g_2; y_{25} = -p*c_1; \ y_{32} = -g_2; \ y_{33} = g_2 + p*c_2; y_{43} = -g_{ap}; \ y_{44} = g; \ y_{48} = g_{an}; \ y_{54} = -2*g_b; y_{55} = g_a + g_{m1}; \ y_{59} = -g_a; \ y_{66} = 1; \ y_{76} = -g_{1a}; y_{77} = g_{1a} + g_{2a} + p*c_{1a}; \ y_{78} = -g_{2a}; \ y_{79} = -p*c_{1a}; y_{87} = -g_{2a}; \ y_{88} = g_{2a} + p*c_{2a}; \ y_{94} = 2*g_b; y_{95} = -g_a; \ y_{99} = g_a + g_{m2}.$$
(13)

Определитель матрицы *Y*, полученный в системе Maple, имеет вид:

$$\begin{split} D_{\text{maple}} &= (((y78*y23*(y55*y99-y59*y95)*y44-\\ &- y48*y79*(y54*y95-y55*y94)*y23+\\ &+ y25*y43*y78*(y54*y99-y59*y94))*y87-\\ &- y88*(y23*(y55*y99-y59*y95)*y44+\\ &+ y43*y25*(y54*y99-y59*y94))*y77)*y32+\\ &+ y22*y33*((-y78*(y55*y99-y59*y95))*y44+\\ &+ y79*y48*(y54*y95-y55*y94))*y87+ \end{split}$$

### + *y*44\* *y*77\* *y*88\* (*y*55\* *y*99- *y*59\* *y*95)))\* *y*11\* *y*66. (14)

При подстановке значений узловых проводимостей из (13) в (14) появляются многочисленные избыточные взаимно уничтожающиеся слагаемые. В первое подмножество входят слагаемые, порождаемые избыточностью матрицы и содержащие квадраты проводимостей (их 170). Второе подмножество состоит из слагаемых, содержащих параметр  $g_b$ (их 48, они содержат нечетный ЗЭН-контур). Третья группа состоит из слагаемых, содержащих как параметр  $g_b$ , так и параметр  $g_a$  (их 56, они содержат нечетный ЗЭН- и четный ЗЭТ-контуры).

Определитель схемы на рис. 2, сгруппированный относительно степеней комплексной частоты. Для параметрического синтеза электрических цепей требуется полиномиальное представление символьных схемных функций. Для нахождения полиномиальных коэффициентов используется рекурсивный алгоритм их раздельного формирования на основе исходной схемы, который генерирует компактное выражение, минуя трудоемкую развертку и свертку выражения [10]. Полиномиальный определитель, полученный с помощью программы CirSym, представляется в следующей форме:

$$D_{\text{cirsym}} = p * p * p * p * A_4 + p * p * P * A_3 + p * p * A_2 + p * A_1 + A_0,$$
(15)

١.

$$\begin{array}{l} \text{The } t = g_a * (g_{m2} + g_{m1}) + g_{m1} * g_{m2}; \\ A_4 = & - C_1 * C_2 * C_{1a} * C_{2a} * t; \quad A_3 = 2 * g_b * (g_{m1} * g_{an} * g_{2a} * C_{1a} * C_{2a} * C_{1a} * G_{2a} + C_{2a} * (G_{1a} * g_{2a} + C_{2a} * (G_{1a} + g_{2a} + C_{2a} * (g_{2a} + g_{1a}))) + C_{1a} * C_{2a} * C_{2a} * (g_{2} + g_{1a}))) + C_{1a} * C_{2a} * C_{2a} * (g_{2} + g_{1})); \quad A_2 = 2 * g_b * (g_{m1} * g_{an} * g_{2a} * C_{1a} * (C_2 * (g_{2} + g_{1}))); \quad A_2 = 2 * g_b * (g_{m1} * g_{an} * g_{2a} * C_{1a} * (C_2 * (g_{2a} + g_{1a})))) + t * (C_1 * (g_2 * (C_{1a} * g_{2a} + C_{2a} * (g_{2a} + g_{1a})))) - t * (C_1 * (g_2 * (C_{1a} * g_{2a} + C_{2a} * (g_{2a} + g_{1a})))) + C_2 * g_{2a} * g_{1a}) + C_{1a} * (g_{2a} * C_2 * (g_2 + g_{1})) + C_2 * g_{2a} * g_{1a}) + C_{2a} * (g_{2a} + g_{1a})); \\ A_1 = 2 * g_b * (g_{m1} * g_{an} * g_{2a} * C_{1a} * g_{2a} * g_{1} + g_{ap} * g_{2} * C_{1} * g_{m2} * g_{2a} * g_{1a}) - t * (C_1 * g_2 * g_{2a} * g_{1a} + C_{1a} * g_{2a} * g_{2a} * g_{1a}) - t * (C_1 * g_2 * g_{2a} * g_{1a} + C_{1a} * g_{2a} * g_{2a} * g_{1a} + C_{2a} * g_{2a} * g_{1a} + G_{2a} * g_{2a} * g_{1a} + g_{2a} * g_{1a} + G_{1a} * g_{2a} * g_{2a} * g_{1a} + C_{2a} * g_{2a} * g_{1a} + g_{2a} * g_{1a} + G_{1a} * g_{2a} * g_{2a} * g_{1a} + C_{2a} * g_{2a} * g_{1a} + G_{2a} * g_{1a} * g_{2a} * g_{1a} + G_{2a} G_{2a} * g_$$

Формула (15) содержит 96 умножений (\*) и 37 сложений (вычитаний), а выражение, полученное системой Maple из формулы (14) в результате исключения 117 пар взаимно уничтожающихся слагаемых, требует 104 и 43 соответствующих операций. Таким образом, метод схемных определителей (программа CirSym) предпочтительней также и при формировании полиномиальных выражений.

**О взаимосвязи определителей схем с зеркальными** элементами и нуллорами. Нуллорная схема получается из схемы с зеркальными элементами путем замены ЗЭН и ЗЕТ на нуллатор и норатор соответственно.

Утверждение. Определитель схемы с зеркальными элементами содержит все слагаемые (без учета знака) определителя соответствующей нуллорной схемы.

Доказательство этого утверждения для определителя схемы с ЗЭН (порождающей схемы) вытекает из формулы

$$\left|\begin{array}{c} \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \\ \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \end{array}\right| = 2 \left|\begin{array}{c} \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \\ \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \end{array}\right| - \left|\begin{array}{c} \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \\ \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \end{array}\right|, (16)$$

полученной из выражения (2) с учетом (4).

В правой части (16) содержится два схемных минора, второй из них является определителем нуллорной схемы. Выражение (16) обуславливает четыре варианта соотношения между слагаемыми этих миноров: 1) все слагаемые определителя нуллорной схемы имеют знак, противоположный знаку слагаемых порождающей схемы с ЗЭН; 2) знаки слагаемых определителя нуллорной схемы частично совпадают со знаками слагаемых порождающей схемы; 3) определитель нуллорной схемы (второе слагаемое в (16)) равен нулю, поэтому определитель схемы с ЗЭН содержит только слагаемые, специфические для схем с зеркальными элементами, что возможно при наличии в схеме нечетного ЗЭН-контура; 4) если заземлен левый полюс, то определитель схемы с ЗЭН эквивалентен определителю нуллорной схемы; при заземлении правого полюса (частный случай варианта 1) определитель с ЗЭН эквивалентен определителю нуллорной схемы, взятому с отрицательным знаком.

Таким образом, утверждение для схемы с ЗЭН доказано. Для схемы с ЗЭТ или с ЗЭТ и ЗЭН доказательство утверждения выполняется аналогично.

Для иллюстрации утверждения (вариант 1) приведем сформированный с помощью программы CirSym определитель нуллорной схемы, соответствующей зеркальной схеме на рис. 2,*a*:

$$D = g*((g_{m1} + g_a)*(y_2*(g_2 + g_1 + y_1) + (g_1 + y_1)*$$

$$g_2)*g_{m2}*(y_{2a}*(g_{2a} + g_{1a} + y_{1a}) + (g_{1a} + y_{1a})*g_{2a}) +$$

$$+g_a*g_{m1}*(y_2*(g_2 + g_1 + y_1) + (g_1 + y_1)*g_2*(y_{2a}*$$

$$(g_{2a} + g_{1a} + y_{1a}) + (g_{1a} + y_{1a})*g_{2a})).$$
(17)

Выражение (17) является безызбыточным и содержит 75 слагаемых, причем они совпадают по модулю (знаки противоположны) с 75 слагаемыми для определителя (11) исходной схемы фильтра с зеркальными элементами. Остальные 20 парных слагаемых из 95 в (11) являются специфическими для схемы с зеркальными элементами.

Для схемы на рис. 2, *а* наблюдается вариант 3 – отсутствие нуллорных слагаемых, если g=0. Примером варианта 2, когда в определителе схемы с зеркальными элементами содержится часть слагаемых нуллорной схемы с собственными, а остальная часть с противоположными знаками, является схема фильтра с токовым конвейером CC+ [4].

**Выводы.** 1. Предложенные схемно-алгебраические формулы для выделения зеркальных элементов и контуров из четного и нечетного числа этих элементов позволяют получать компактные безызбыточные символьные выражения схемных функций.

2. Установлено, что определитель схемы с зеркальными элементами содержит все слагаемые (без учета знаков) определителя соответствующей нуллорной схемы и дополнительные слагаемые, специфические для схем с зеркальными элементами.

3. Матричный определитель схемы с зеркальными элементами содержит не только многочисленные взаимно уничтожающиеся слагаемые с квадратами незаземленных проводимостей, но и слагаемые с проводимостями, образующими четные контуры с зеркальными элементами, что ставит под сомнение целесообразность использования модифицированного метода узловых напряжений для символьного анализа электрических цепей.

#### \_СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sanchez-Lopez C., Fernandez F.V., Tlelo-Cuautle E., Tan S.X.-D. Pathological element-based active device models and their application to symbolic analysis. — IEEE Trans. on circuits and systems–I: regular papers, 2011, vol. 58,  $N_{0}$  6, pp. 1382–1395.

2. **Soliman A.M.** Synthesis of oscillators using limit variables and NAM expansion. — Hindawi Publishing Corporation: Active and passive electronic components, 2011, vol. 2011. Article ID 131546.

3. Sanchez-Lopez C. Pathological equivalents of fully-differential active devices for symbolic nodal analysis. — IEEE Trans. on circuits and systems–I: regular papers, 2013, vol. 60,  $\mathbb{N}$  6, pp. 603–614.

4. Slezak J., Sotner R. Circuit Synthesis Using Admittance Network Modification in MATLAB. — Proc. 16th International Conf. «Mixed Design of Integrated Circuits and Systems», Lodz (Poland), June 2009, pp. 612–617.

5. Кирхгоф Г.Р. Избранные труды. – М.: Наука, 1988, 428 с.

6. **Филаретов В.В.** Топологический анализ электронных схем методом выделения параметров. – Электричество, 1998, № 5, с. 43–52.

7. **Филаретов В.В.** Топологический анализ электрических цепей с зеркальными аномальными элементами. — Международ. сборник научн. тр. «Синтез, анализ и диагностика электронных цепей». — Ульяновск: УлГТУ, 2012, вып. 10, с. 66—92.

8. Filaretov V.V., Gorshkov K.S. Topological Analysis of Active Networks Containing Pathological Mirror Elements. — Proc. of IEEE 33th International Scientific Conf. Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kiev (Ukraine), April 2013, pp. 460–464.

9. Филаретов В.В. О схемных триадах Л.И. Волгина, порождаемых поворотом активного трехполюсника в электрических цепях. — Тр. Международ. конф. КЛИН-2003 «Схемно-топологические модели активных электрических цепей: синтез и анализ». — Ульяновск: УлГТУ, 2003, т. 4, с. 86–94.

10. Дьяконов В.П. Maple 9.5/10 в математике, физике и образовании. М.: Солон-Пресс, 2006, 720 с.

#### [04.07.13]

Авторы: Курганов Сергей Александрович окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института (ныне Ульяновский государственный технический университет УГТУ). В 2006 г. защитил докторскую диссертацию «Символьный анализ и диакоптика линейных электрических цепей» в Санкт-Петербургском государственном политехническом институте. Профессор, зам. заведующего кафедрой «Электроснабжение» УГТУ.

Филаретов Владимир Валентинович окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института. В 2002 г. защитил докторскую диссертацию «Топологический анализ электрических цепей на основе схемного подхода» в Московском энергетическом институте. Профессор кафедры «Электроснабжение» УГТУ.