

*made of 0.35 mm thick Grade 2412 steel. The efficiency of the asynchronous drive taking power supply from the FC is by 3,5% lower as compared with the case of supplying power to it directly from the 50 Hz network.*

**Key words:** *converter-fed inductor drive, asynchronous motor, energy efficiency, comparative analysis*

## REFERENCES

1. Kolomeitsev L.F., Pakhomin S.A., Bibikov V.I., Kolomeitsev G.V. *Izv. vuzov. Elektromekhanika – in Russ. (News of Higher Education Institutions. Electrical Mechanics)*, 2008, No. 1, pp. 69–72.

2. David G. Dorrell, Andrew M. Knight, Mircea Popescu, Lyndon Evans, David A. Station Comparison of Different Motor Design Drives for Hybrid Electric Vehicles: [http://www.motor-design.com/cmsAdmin/uploads/ecce\\_2010\\_hybridvehicles.pdf](http://www.motor-design.com/cmsAdmin/uploads/ecce_2010_hybridvehicles.pdf) (дата обращения: 01.06.2016).

3. Gollandtsev Yu.A. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy – in Russ. (Information and Control Systems)*, 2006, No. 6, pp. 50–53.

4. Rozhitskii D.B., Batalov Ye.V., Filatkin M.S. *Energoberezheniye – in Russ. (Energy Savings)*, 2005, No. 2, pp. 38–42.

5. *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin: Uchebnik dlya vuzov/Pod red. I.P. Kopylova, 3-ye izd. (Design of electrical machines/Edit. by I.P. Kopylov, 3rd publ.)*. Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 2002, 757 p.

\* \* \*

*Электричество, 2017, № 1, с. 47–53.*

## Формирование схемных функций для дискретно-аналоговых цепей с переключаемыми конденсаторами<sup>1</sup>

ГОРШКОВ К.С., КУРГАНОВ С.А., ФИЛАРЕТОВ В.В.

*Установлено, что в функциях схем с переключаемыми конденсаторами (ПК) появляются избыточные, — равные по модулю, но противоположные по знаку, пары слагаемых в виде произведения емкостей и комплексных емкостей двух разноименных ПК. Доказано, что эти избыточные слагаемые схемных функций соответствуют определителям вырожденных схем с нуллорами. Это создает возможность исключить избыточные подвыражения в процессе выделения параметров по методу схемных определителей.*

**Ключевые слова:** *переключаемый конденсатор, z-преобразование, символьный анализ, определитель схемы, нуллок*

**О методах анализа дискретно-аналоговых цепей с переключаемыми конденсаторами (ПК).** Параметрические дискретно-аналоговые схемы с ПК нашли широкое применение в системах обработки сигналов (электрических фильтрах, интеграторах, сумматорах, цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователях) и телекоммуникационных АМ- и ЧМ-системах [1, 2]. Символьный анализ схем с ПК [3–10] в отличие от численного анализа позволяет выполнить параметрический синтез цепей [4], найти условия существования искомого режима [1, 6] и исследовать неисправности в электрических цепях [9].

Для анализа схем с ПК в частотной области и формирования символьных схемных функций (ССФ) используются z-преобразование [11] и комплексные z-схемы замещения [1, 3, 6]. Комплексный оператор имеет вид  $z = e^{j\omega T}$ , где  $j$  — мнимая единица;  $\omega$  — частота;  $T$  — период коммутации ключей.

Выражения для передаточных функций дискретно-аналоговых схем с ПК разделены по фазам

[8]. На практике нашли применение двухфазные ПК (табл. 1). Как показано в [10], комплексные схемы замещения для уменьшения избыточности выражений схемных функций целесообразно строить не на двухполюсных емкостях [6, 8], а на источниках тока, управляемых напряжением (ИТУН), с емкостным параметром (табл. 1) [3]. На этих и последующих схемах символами  $o$  и  $e$  обозначены сигналы в нечетные и четные, соответственно, интервалы времени.

Символьные схемные функции формируются на основе матричного [9], топологического [3, 6, 7] или схемно-алгебраического [8, 10] подходов, различающихся способом представления схемы в виде графа, матрицы или непосредственно схемы замещения, соответственно. К матричным методам относится метод двоичных диаграмм деления [9]. Топологические и схемно-алгебраические методы отличаются от матричных наглядностью и, что важнее, частичным или полным устранением избыточных (взаимно уничтожающихся) слагаемых в выражениях ССФ [7]. Наличие избыточных слагаемых может привести к вычитанию двух больших приблизительно равных чисел и, как следствие, не

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-07-05847, а также гранта Правительства РФ № 074-U01.

только к численным, но и фактическим ошибкам в виде ложных полиномиальных коэффициентов.

Преимущество схемно-алгебраического подхода или метода схемных определителей (МСО) [8, 10] — полное отсутствие избыточности из-за неоднократного отображения параметров в матрице или графе. В МСО построение символьных выражений осуществляется с помощью рекурсивного выделения параметров. Например, схемно-алгебраическая формула (САФ) коэффициента передачи напряжения в нечетные фазы для трехполюсной цепи с двухфазным управлением (рис. 1) имеет вид:

$$K_{oo} = \frac{U_2^o}{U_1^o} = \frac{N}{D} = \left| \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right| / \left| \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right| \quad (1)$$

В (1) парой вертикальных линий обозначен определитель соответствующей схемы. Схема числителя получена заменой на рис. 1 источника ЭДС норатором (двойная заштрихованная стрелка в (1)), а приемника напряжения — нулатором (одинарная стрелка в (1)); схема знаменателя — заменой источника ЭДС проводником [8, 12].

Для получения ССФ схемные определители в (1) раскрываются с помощью формул выделения

параметров; для емкости  $C$  и комплексной емкости  $C_z = Cz^{-1/2}$  формулы имеют вид [8]:

$$\Delta = C\Delta_C + \Delta^C; \quad \Delta = C_z\Delta^{C_z} + \Delta_{C_z}, \quad (2)$$

где  $\Delta$ ,  $\Delta_C$ ,  $\Delta_{C_z}$ ,  $\Delta^{C_z}$ ,  $\Delta^C$  — определители схем; верхние и нижние индексы означают, что в схеме удалены и стянуты (заменены проводниками) соответствующие элементы.

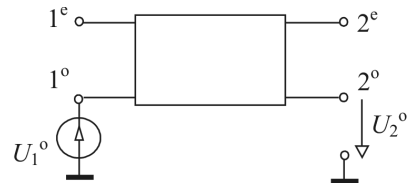


Рис. 1. Схема для определения коэффициента передачи напряжения в нечетные фазы; прямоугольником обозначена  $z$ -схема замещения произвольной двухфазной схемы с ПК

Формулы выделения управляемых источников (УИ) — источников напряжения, управляемых напряжением, и ИТУН с емкостным параметром — имеют вид [8, 10]:

$$\Delta = \chi\Delta_\chi + \Delta^\chi, \quad (3)$$

Таблица 1

№ п/п	Наименование переключаемых конденсаторов (ПК)	
	Исходная схема	Комплексная схема замещения (оператор $s = z^{-1/2}$ )
1	ПК общего вида	
2	Заземленный конденсатор для передачи напряжения между каналами	
3	Конденсатор с одноканальной передачей напряжения	
4	Незаземленный конденсатор для передачи напряжения между каналами	
5	Одноканальный конденсатор с одним ключом	

где  $\chi$  – параметр УИ;  $\Delta_\chi$  – определитель производной схемы, полученной из исходной схемы путем замены УИ нуллором;  $\Delta^\chi$  – определитель производной схемы, которая образована при  $\chi=0$ .

**Избыточные слагаемые при символьном анализе биквада Лакера–Флешера.** На рис. 2 представлена схема с биквадратичной функцией передачи напряжения – биквад Лакера–Флешера [1, 4–6], который содержит два идеальных операционных усилителя (ОУ) и 12 ПК. В [1, 4, 5] рассмотрен анализ этой схемы при фиксации уровня входного напряжения в течение всего периода коммутации. При этом двухканальная  $z$ -схема замещения биквада на рис. 3 приводится к эквивалентной одноканальной схеме с учетом следующих соотношений для входных и выходных напряжений ОУ соответственно [1]:

$$U_{ВХ}^e = z^{-1/2} U_{ВХ}^o U_{ВЫХ}^e = z^{-1/2} U_{ВЫХ}^o, \quad (4)$$

а передаточная функция формируется без избыточных слагаемых (символ емкости  $C$  здесь не приводится) [4]:

$$K = ((dk + dj - al - ah)s^4 + (-2dk + al + ag - dj - di)s^2 + d(k + i)) / ((ae - db)s^4 + (-ae + 2db - ac + df)s^2 - d(f + b)). \quad (5)$$

Однако в произвольном случае при анализе биквада в режиме несимметричного воздействия (при подаче напряжения только на нечетных/четных интервалах или двукратной выборке входного напряжения) в ССФ образуются равные по модулю, но противоположные по знаку слагаемые [10]. В строках 1 и 2 табл. 2 проведено сравнение матричного метода диаграмм деления [9] с МСО по числу избыточных взаимно уничтожающихся слагаемых в выражении передаточной функции при нечетной фазе входного и выходного напряжения.

Как видно, выражение, полученное по «безызыточному» МСО, также содержит избыточные

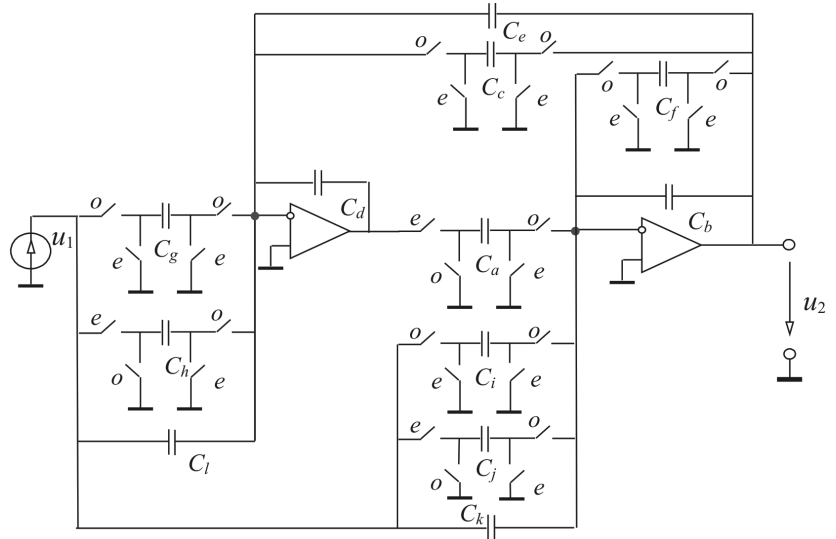


Рис. 2. Схема биквада Лакера–Флешера

слагаемые (строка 2 в табл. 2) [10], что указывает на существование как 10 избыточных слагаемых, обусловленных наличием одинаковых параметров в нескольких клетках матрицы, так и до сих пор не исследованных 22 избыточных слагаемых, присущих анализу схем с ПК. Целью статьи является исследование образования избыточных слагаемых, специфических для схем с ПК, и обобщение МСО для безызыточного анализа схем на ПК.

**Дуальные тождества для избыточных слагаемых с параметрами двух ПК.** Рассмотрим схему замещения цепи с двумя ПК  $C_1$  и  $C_2$ , которая содержит по одному конденсатору и одному ИТУН от каждого ПК (строка 1 в табл. 1). Определитель такой схемы имеет вид:

$$\begin{aligned} & \left| \begin{array}{cc} U_1 & U_2 \\ \begin{array}{c} C_1 \\ \text{ИТУН} \end{array} & \begin{array}{c} C_2 \\ \text{ИТУН} \end{array} \end{array} \right| = sC_1C_2 \cdot \left| \begin{array}{c} \text{ИТУН} \\ C_1 \end{array} \right| + sC_2C_1 \cdot \left| \begin{array}{c} \text{ИТУН} \\ C_2 \end{array} \right| \\ & \left| \begin{array}{c} \text{ИТУН} \\ C_1 \end{array} \right| + D_o. \end{aligned} \quad (6)$$

Первый частичный определитель в (6) получен выделением ИТУН с параметром  $sC_1$  и конденсатора  $C_2$ , а второй определитель – выделением ИТУН

Таблица 2

№ п/п	Метод построения формулы	Общее число слагаемых		Действительных слагаемых		Избыточных слагаемых
		числителя	знаменателя	числителя	знаменателя	
1	Матричный	66	44	42	36	32
2	МСО	56	44			22
3	МСО с тождествами (7) и (8)	42	36			0

с проводимостью  $sC_2$  и конденсатора  $C_1$ . Оставшийся частичный определитель обозначен  $D_o$ . Если первый и второй частичные определители равны по модулю, но противоположны по знаку, то в формуле появляются избыточные взаимно уничтожающиеся слагаемые.

Сумма двух частичных определителей может быть представлена в виде одного схемного определителя с нулевым значением. Возможны два варианта этого тождества. Первое содержит двухмерный генератор тока, управляемый нуллатором [13]:

$$\left| \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline \begin{array}{c} \overleftarrow{g_2} \parallel G_2 \\ \overrightarrow{g_1} \parallel G_1 \end{array} \\ \hline \overrightarrow{G_1(G_2)} \end{array} \\ \hline \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline \overleftarrow{g_2} \parallel G_2 \\ \hline \overrightarrow{G_1} \end{array} \\ \hline \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline \overleftarrow{g_1} \parallel G_1 \\ \hline \overrightarrow{G_2} \end{array} \\ \hline \end{array} \right| = -G_1g_2 + g_1G_2 = 0, \tag{7}$$

где для сокращения записи параметр ИТУН – комплексная емкость – обозначен символом  $G$  с соответствующим индексом, а емкость конденсатора – символом  $g$ , причем  $G_1 = sg_1$ ,  $G_2 = sg_2$ . Параметр нуллатора принимает значения  $G_1$  или  $G_2$  при выделении ИТУН с соответствующим параметром, при этом другой ИТУН нейтрализуется.

Второе тождество содержит дуальный двухмерный источник – норатор с управляющими ветвями  $U_{G1}$  и  $U_{G2}$ :

$$\left| \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline \overleftarrow{U_{G2}} \\ \overrightarrow{U_{G1}} \\ \hline \overleftarrow{g_2} \parallel G_2 \\ \overrightarrow{g_1} \parallel G_1 \end{array} \\ \hline \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline \overleftarrow{g_2} \parallel G_2 \\ \hline \overrightarrow{G_1} \end{array} \\ \hline \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline \overleftarrow{g_1} \parallel G_1 \\ \hline \overrightarrow{G_2} \end{array} \\ \hline \end{array} \right| = -G_1g_2 + g_1G_2 = 0, \tag{8}$$

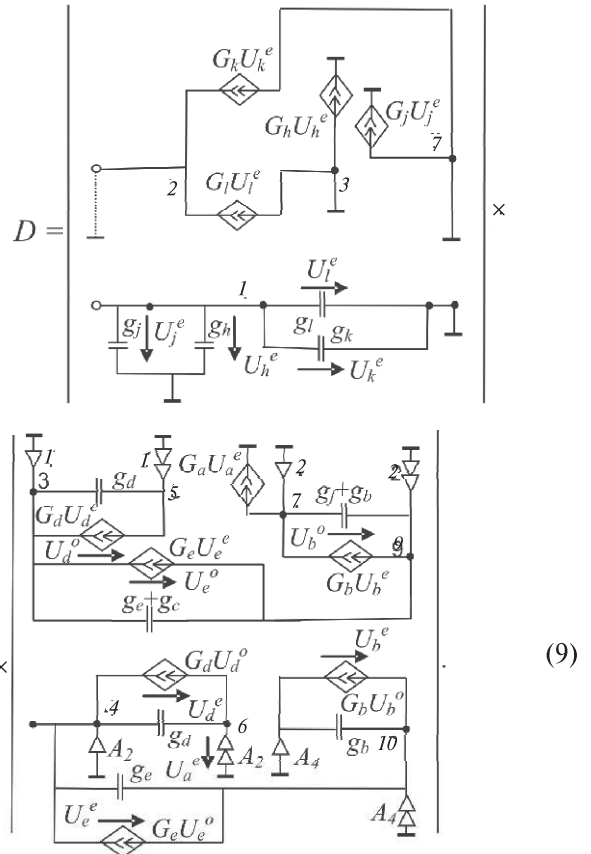
где при выделении двухмерного источника первый приемник преобразуется в нуллатор, а второй приемник удаляется, во втором слагаемом операции над приемниками меняются местами.

Тождества (7) и (8) используются в системе анализа, диагностики и синтеза электронных цепей SCADS [8] при формировании функций схем на ПК методом схемных определителей наряду с другими признаками вырождения [12], что иллюстрируется следующим примером.

**Анализ биквада Лакера—Флешера при подаче напряжения в нечетные интервалы.** Пусть требуется сформировать передаточную функцию для нечетных фаз напряжения в схеме биквада на рис. 2. Для этого используется схема замещения биквада с моделями ПК на ИТУН (рис. 3), преобразованная в соответствии с частными формулами выделения проводимостей и ИТУН. Искомый коэффициент передачи напряжения формируется по  $z$ -схеме на

рис. 3 как отношение числителя к знаменателю в соответствии с (1).

**Формирование знаменателя.** Исходная схема знаменателя согласно формуле (1) получается из схемы на рис. 3 путем замыкания входа. После замены ОУ на нуллоры, выделения ИТУН и проводимостей применяется формула деления по пяти узлам 3, 4, 7, 8 и 0 [14]. В результате знаменатель получает вид:



В первом сомножителе (9) генераторы всех ИТУН не оказывают влияния. Определитель оставшейся схемы равен сумме проводимостей. Во втором сомножителе (9) выделяется параметр ИТУН  $G_a$ , который является единственным элементом из ПК  $a$ . В результате выражение знаменателя имеет вид:

$$D = (g_h + g_f + g_l + g_k)[G_a D_{Ga} + D^{Ga}], \tag{10}$$

где  $D_{Ga}$ ,  $D^{Ga}$  – частичные определители, полученные из второго определителя в (9) по формуле (3), которые также раскрываются по правилам МСО. В частности, после выделения и удаления проводимостей и ИТУН, выделения нуллора [12] получается выражение, содержащее тождество вида (7):

$$D_{Ga}^{Gd} = g_d \left| \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline \overleftarrow{g_b} \parallel G_b \\ \overrightarrow{g_c} \parallel G_c \\ \hline \overrightarrow{G_b(G_c)} \end{array} \\ \hline \end{array} \right| =$$

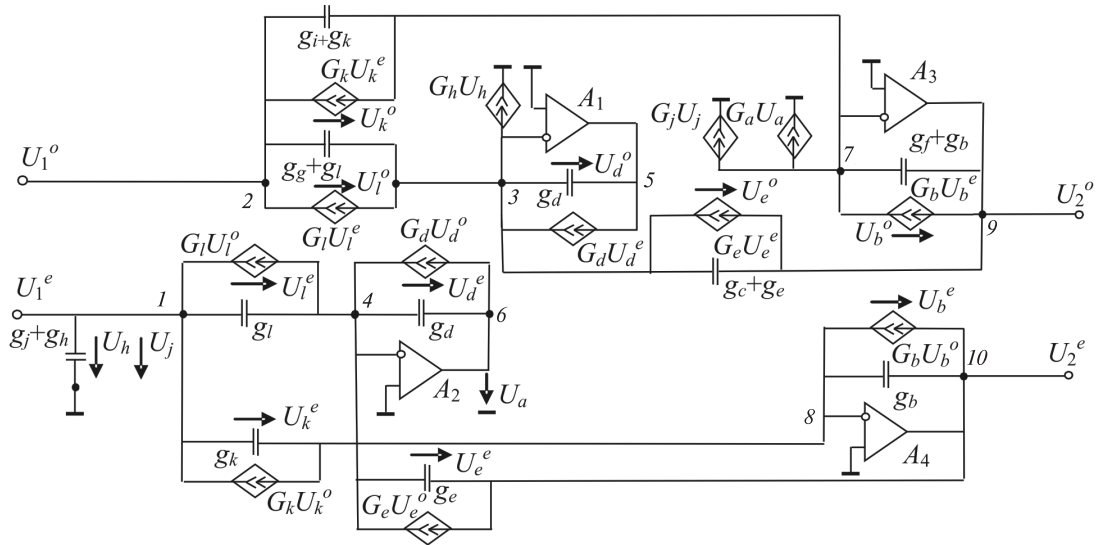


Рис. 3. Комплексная z-схема замещения биквада Лакера—Флшера

$$= g_d (G_b g_e - g_b G_e) = 0. \quad (11)$$

После преобразований (10) знаменатель получает вид:

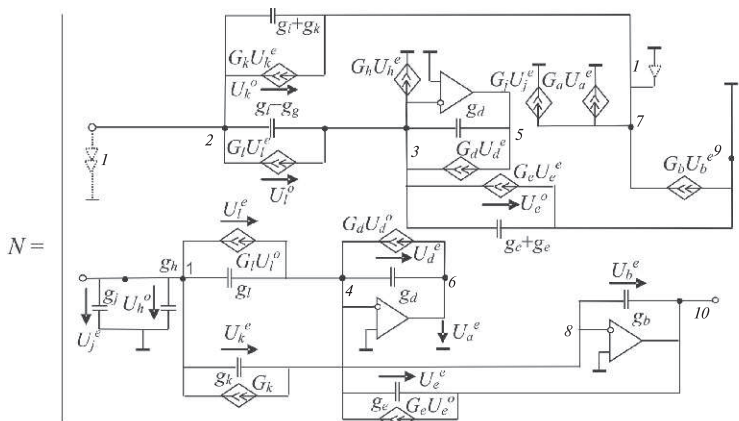
$$D = (g_h + g_j + g_l + g_k) \{G_a [-G_d (G_e G_b - (g_e + g_c) g_b)] + (g_d^2 - G_d^2) [(g_b + g_f) g_b - G_b^2]\}. \quad (12)$$

**Формирование числителя.** Исходная схема числителя согласно формуле (1) получается из схемы на рис. 3 путем подсоединения ноллатора и нуллатора к входу и выходу соответственно. После выделения нуллов и проводимостей САФ числителя приводится к виду:

В процессе разложения частичного определителя  $N_{G_a}$  из (14) образуются три тождества (7) или (8) в составе следующих частичных определителей:

$$N_{G_a}^{gg, (gh+gj), gb} = \left| \begin{array}{cc} \overrightarrow{U_{G_l}} & \overleftarrow{U_{G_d}} \\ g_l & G_d(G_l) \end{array} \right| = G_l g_d - g_l G_d = 0; \quad (15)$$

$$N_{G_a}^{(gh+gj), Gh, gg} = \left| \begin{array}{cc} g_k & G_k \\ G_l & G_l(G_k) \end{array} \right| = (G_k g_l - G_l g_k) = 0; \quad (16)$$



В результате выделения в САФ (13)  $G_a$  получается выражение

$$N = G_a N_{G_a} + N^{G_a}. \quad (14)$$

$$N_{G_a}^{(gh+gj), gb} = (G_e G_d + g_e g_d) \left| \begin{array}{cc} g_k & G_k \\ G_l & G_l(G_k) \end{array} \right| = (G_e G_d + g_e g_d) (G_k g_l - G_l g_k) = 0. \quad (17)$$

Частичный определитель  $N^{G_a}$  в (14) получается из (13) после удаления ИТУН  $G_a$ . Этот определитель можно представить в виде произведения двух частичных определителей:

$$N^{G_a} = \left| \begin{array}{cc} \overrightarrow{U_{G_l}} & \overleftarrow{U_{G_d}} \\ g_l & G_d(G_l) \end{array} \right| \times \left| \begin{array}{cc} g_k & G_k \\ G_l & G_l(G_k) \end{array} \right| \quad (15)$$

$$\times \left[ \begin{array}{c} \text{Stage 1} \\ \text{Stage 2} \end{array} \right] = N1 * N2. \quad (18)$$

Формула (18) получена делением схемы определителя по трем узлам: 3, 4 и 0. Символьные выражения  $N1$  и  $N2$  из этой формулы формируются аналогично ранее найденным составляющим числителя. При разложении частичного определителя  $N1$  образовалось тождество вида (8):

$$N1_{G_l}^{(g_i+g_k), G_j} = \left| \begin{array}{c} \text{Circuit} \end{array} \right| = \mathbf{G_l g_d - g_l G_d = 0}. \quad (19)$$

Нулевые частичные определители (15)–(17) и (19) удаляются в процессе разложения числителя. В результате получается искомая формула для числителя  $K_{00}$  без избыточных слагаемых:

$$\begin{aligned} N = & G_a \{ (g_h + g_j) [g_b g_g (-G_d) - G_k (g_e g_d G_e G_d)] + \\ & + g_b (G_h G_d (G_l + G_k) + g_g (g_l + g_k) (-G_d) + \\ & + [(g_l + g_k) g_l - G_k G_l - G_l G_l] (-G_d) \} + (g_i + g_k) \times \\ & \times (-g_b (g_j + g_h + g_l + g_k)) - G_l (-G_j g_b) + \\ & + (g_j + g_h + g_l) G_k G_b + G_k g_b (G_k + G_j) \times \\ & \times (g_d g_d - G_d G_d). \end{aligned} \quad (20)$$

Полученная формула передаточной функции напряжения для нечетных интервалов коммутации  $K_{00} = N / D$  содержит в числителе (20) и знаменателе (12) соответственно 42 и 36 слагаемых, т.е. является формулой без избыточности (строка 3 в табл. 2). Формула для  $K_{00}$  тождественна избыточным формулам рассматриваемого биквада, приведенным в [10].

Как видно, учет тождеств (7) и (8) позволяет устранить избыточные слагаемые, специфические для схем с ПК, в процессе выделения элементов и подсхем по МСО. Это исключает трудоемкое развертывание схемной функции с последующей сортировкой, отбраковкой избыточных слагаемых и свертыванием оставшегося выражения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fleischer P.E., Laker K.R. A family of active switched-capacitor biquad building blocks. — The Bell System Technical Journal, 1979, vol. 58, No. 10, pp. 2235–2269.
2. Allen P., Sanchez-Sinencio E. Switched capacitor circuits. — New York: VNR, 1984, 759 p.

3. Konczykowska A., Bon M. Topological analysis of switched-capacitor networks. — Electronics letters, 1980, vol. 16, No. 3, pp. 2–3.

4. Гауси М., Лакер К. Активные фильтры с переключаемыми конденсаторами. — М.: Радио и связь, 1986, 168 с.

5. Gielen G.G.E., Sansen W., Walscharts H.C.C. ISAAC: A Symbolic Simulator for Analog Integrated Circuits. — IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1989, vol. 24, No. 6 (December), pp. 1587–1597.

6. Мулявка Я. Схемы на операционных усилителях с переключаемыми конденсаторами. — М.: Мир, 1992, 416 с.

7. Korotkov A.S., Morosov D.V. Topological analysis of continuous and discrete time linear circuits using Nathan rules. — Proc. of Int. Conf. Symbolic methods and applications to circuits design (SMACD-2002), Sinaia (Romania), October 2002, pp. 35–42.

8. Коротков А.С., Курганов С.А., Филаретов В.В. Символьный анализ дискретно-аналоговых цепей с переключаемыми конденсаторами. — Электричество, 2009, № 4, с. 37–47.

9. Cheng J., Shi G., Tai A., Lee F. Symbolic fault modeling for switched-capacitor circuits. — IEEE Int. Conf. IEEE Reg. 10 (TENCON 2013), October 2013, pp. 1–4.

10. Filaretov V.V., Gorshkov K.S., Kurganov S.A. Parameters extraction technique for optimal network functions of SC circuits. — Proc. of International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015), Omsk (Russia), May 2015, pp. 1–6.

11. Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. — М.: Наука, 1971, 288 с.

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

13. Filaretov V.V., Korotkov A.S. Generalized parameter extraction method in case of multiple excitation. — Proc. 8th Int. Workshop on Symbolic methods and applications to circuit design (SMACD'04), Wroclaw (Poland), Sept. 2004, pp. 8–11.

14. Филаретов В.В. Метод двоичных векторов для топологического анализа электронных схем по частям. — Электричество, 2001, № 8, с. 33–42.

[26.10.2015]

*Авторы: Горшков Константин Сергеевич окончил радиотехнический факультет Ульяновского государственного университета (УГТУ). В 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию «Структурный синтез и символьный допусковый анализ электрических цепей методом схемных определителей» в Московском энергетическом институте (МЭИ). Доцент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.*

*Курганов Сергей Александрович окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института (ныне — УГТУ). В 2006 г. защитил докторскую диссертацию «Символьный анализ и диакоптика линейных электрических цепей» в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете. Профессор кафедры «Электроснабжение» УГТУ.*

*Филаретов Владимир Валентинович окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института (ныне — УГТУ). В 2002 г. защитил докторскую диссертацию «Топологический анализ электрических цепей на основе схемного подхода» в МЭИ. Профессор кафедры «Электроснабжение» УГТУ.*

## Synthesis of Network Functions for the Discrete-Analog Circuits with Switched Capacitors

**GORSHKOV Konstantin Sergeyeovich** (*St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, Russia*) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**KURGANOV Sergei Aleksandrovich** (*Ul'yanovsk State Technical University (USTU), Ul'yanovsk, Russia*) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

**FILARETOV Vladimir Valentinovich** (*USTU, Ul'yanovsk, Russia*) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

*It is established that the expressions of network functions for circuits with switched-capacitors is non free-cancelled because they contain these redundant pairs of summands as a product of capacitors and complex capacitors two different switched-capacitors. It is proved that these redundant summands correspond to the determinants of circuits with nullors. This eliminates of redundant subexpressions of network functions in the process of parameter extraction using of circuit determinant method.*

**Key words:** *switched-capacitor, z-transform, symbolic analysis, circuit determinant, nullor*

### REFERENCES

1. **Fleischer P.E., Laker K.R.** A family of active switched-capacitor biquad building blocks. — *The Bell System Technical Journal*, 1979, vol. 58, No. 10, pp. 2235–2269.
2. **Allen P., Sanchez-Sinencio E.** Switched capacitor circuits. — New York: VNR, 1984, 759 p.
3. **Konczykowska A., Bon M.** Topological analysis of switched-capacitor networks. — *Electronics letters*, 1980, vol. 16, No. 3, pp. 2–3.
4. **Gausi M., Laker K.** *Aktivnye fil'try s pereklyuchayemyimi kondensatorami* (Active filters with switchable capacitors). Moscow, Publ. «Radio i svyaz», 1986, 168 p.
5. **Gielen G.G.E., Sansen W., Walscharts H.C.C.** ISAAC: A Symbolic Simulator for Analog Integrated Circuits. — *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1989, vol. 24, No. 6 (December), pp. 1587–1597.
6. **Mulyavka Ya.** *Skhemy na operatsionnykh usilitelyakh s pereklyuchayemyimi kondensatorami* (Circuits with operational amplifier with switchable capacitors). Moscow, Publ. «Mir», 1992, 416 p.
7. **Korotkov A.S., Morosov D.V.** Topological analysis of continuous and discrete time linear circuits using Nathan rules. — *Proc. of Int. Conf. Symbolic methods and applications to circuits design (SMACD–2002)*, Sinaia (Romania), October 2002, pp. 35–42.
8. **Korotkov A.S., Kurganov S.A., Filaretov V.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2009, No. 4, pp. 37–47.
9. **Cheng J., Shi G., Tai A., Lee F.** Symbolic fault modeling for switched-capacitor circuits. — *IEEE Int. Conf. IEEE Reg. 10 (TENCON 2013)*, October 2013, pp. 1–4.
10. **Filaretov V.V., Gorshkov K.S., Kurganov S.A.** Parameters extraction technique for optimal network functions of SC circuits. — *Proc. of International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015)*, Omsk (Russia), May 2015, pp. 1–6.
11. **Dech G.** *Rukovodstvo k prakticheskomu primeneniyu preobrazovaniya Laplasy i Z-preobrazovaniya* (Guid to the practical application of the Laplace transform and Z-transform). Moscow, Publ. «Nauka», 1971, 288 p.
12. **Filaretov V.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1998, No. 5, pp. 43–52.
13. **Filaretov V.V., Korotkov A.S.** Generalized parameter extraction method in case of multiple excitation. — *Proc. 8th Int. Workshop on Symbolic methods and applications to circuit design (SMACD'04)*, Wroclaw (Poland), Sept. 2004, pp. 8–11.
14. **Filaretov V.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2001, No. 8, pp. 33–42.