

Обобщенные безызбыточные формулы для чувствительности схемных функций линейных электрических цепей

КУРГАНОВ С. А., ФИЛАРЕТОВ В. В.

Формулы для получения символьных функций относительной чувствительности обобщены на произвольные параметры с помощью многократных суммарных алгебраических дополнений (МСАД). Раскрытие МСАД методом схемных определителей уменьшает объем вычислений для формирования компактных выражений без избыточных взаимно уничтожающихся слагаемых. Учет топологических особенностей схем приводит к двукратному сокращению числа МСАД в выражениях чувствительности.

Ключевые слова: схемная функция, относительная чувствительность, тождество Якоби, многократное суммарное алгебраическое дополнение, определитель схемы

Формулы относительной чувствительности. Под относительной чувствительностью [1] понимается отношение изменения схемной функции F к соответствующему изменению параметра W элемента схемы [2–7]:

$$S = \frac{dF}{F} \frac{W}{dW}. \quad (1)$$

После дифференцирования формула (1) записывается в виде разности отношений (произведений) алгебраических дополнений, содержащей взаимно уничтожающиеся слагаемые. Если не предусматривается выделение рассматриваемого параметра, то требуется взятие частных производных по узловым проводимостям [7], что умножает число избыточных слагаемых.

В [1] предложена формула чувствительности для коэффициента передачи напряжения $K = U_3 / U_1$ схемы на рис. 1 в виде отношения произведений определителя и алгебраических дополнений матрицы контурных сопротивлений или узловых проводимостей

$$S_W^K = -W \frac{\Delta_{15} \Delta_{73}}{\Delta \Delta_{13}}, \quad (2)$$

где W – передаточное сопротивление Z источника напряжения, управляемого током (ИНУТ), или передаточная проводимость Y источника тока, управляемого напряжением (ИТУН); Δ – определитель матрицы контурных сопротивлений ($\Delta = \Delta_{11}$ для матрицы узловых проводимостей); Δ_{11} , Δ_{15} , Δ_{13} , Δ_{73} – алгебраические дополнения контурной или узловой матрицы.

Формула (2) получена из (1) с помощью тождества Якоби в виде

$$\Delta_{13,75} \Delta = \Delta_{13} \Delta_{75} - \Delta_{15} \Delta_{73}. \quad (3)$$

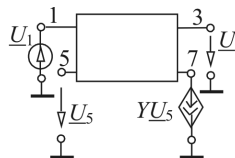


Рис. 1. Y -схема с заземленными элементами для нахождения функции чувствительности коэффициента передачи напряжения по параметру ИТУН

В общем случае воздействие, отклик, генератор и приемник управляемого источника (УИ) не соединены с базисным узлом схемы (рис. 2).

Известно обобщение результата Боде (2) с помощью многократных суммарных алгебраических дополнений (МСАД) [2] для обратной матрицы схемы в однородном или смешанном координатном базисе [3]. Например, формула для чувствительности передаточного сопротивления по проводимости ИТУН (рис. 2, в) имеет вид [3]:

$$S_Y^{Z_{пер}} = -Y \frac{Z_{(1+2)(5+6)} Z_{(7+8)(3+4)}}{Z_{(1+2)(3+4)}}, \quad (4)$$

где $Z_{(1+2)(5+6)}$, $Z_{(7+8)(3+4)}$, $Z_{(1+2)(3+4)}$ – МСАД обратной матрицы схемы. Элементы обратной матрицы приводят к избыточным взаимно сокращающимся множителям, которые могут быть исключены путем приведения (4) к виду (2), если элементы обратной матрицы записать через элементы исходной матрицы.

Чувствительности других схемных функций находятся в [3] опосредованным образом – через чувствительности передаточного $S_Y^{Z_{пер}}$, входного $S_Y^{Z_{вх}}$ и выходного $S_Y^{Z_{вых}}$ сопротивлений. Так, чувствительность коэффициента передачи напряжения имеет вид [3]:

$$S_Y^K = S_Y^{Z_{пер}} - S_Y^{Z_{вх}}. \quad (5)$$

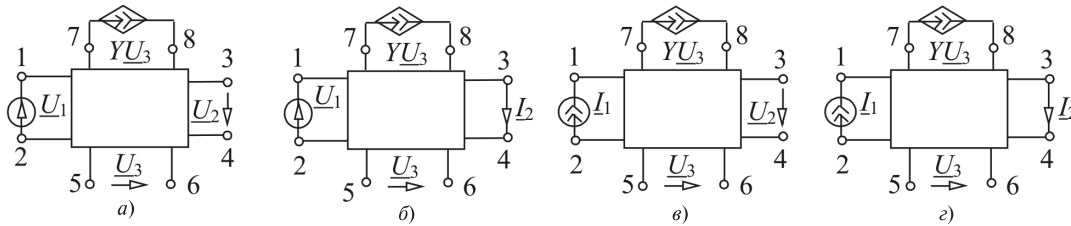


Рис. 2. Схемы для нахождения функции чувствительности по параметру ИТУН: а — коэффициента передачи напряжения; б — передаточной проводимости; в — передаточного сопротивления; г — коэффициента передачи тока

Формулы вида (4) и (5) предназначены для численного расчета чувствительности [3]. При нахождении чувствительности в символьном виде недостатком разностных формул вида (5) является их повышенная трудоемкость — требуется раскрыть пять МСАД (определителей) вместо четырех по (2). При этом разность выражений увеличивает число взаимно уничтожающихся слагаемых. В (4), кроме трех МСАД, требуется раскрыть еще определитель, поскольку $Z_{(a+c)(b+d)} = \Delta_{(a+c)(b+d)} / \Delta$. Таким образом, до сих пор не существует удовлетворительного обобщения формулы Боде (2), что является целью настоящей статьи.

Обобщенные формулы относительной чувствительности. Разложение МСАД связано с образованием избыточных взаимно уничтожающихся слагаемых, обусловленных многократным участием параметров элементов в матрице. От этого недостатка избавляет использование формул чувствительности с индексами сторон многополюсной подсхемы [4, 5]. При этом сомножителями формул вида (2) являются схемные определители. Схемно-алгебраические формулы (САФ) [5] позволяют находить функции для чувствительности через определители исходной схемы и определители производных от нее схем — схемные миноры — путем рекурсивного выделения параметров [8].

В то же время достоинством формул чувствительности вида (2) является более компактная запись, не требующая изображений схем и поэтому предпочтительная для обобщения. Такое обобщение необходимо выполнить, сохранив основное преимущество САФ — отсутствие избыточных взаимно уничтожающихся слагаемых [5]. Перенести это основное преимущество САФ на формулы чувствительности вида (2) можно, если раскрывать МСАД методом схемных определителей [9].

На рис. 2 показаны схемы для нахождения чувствительности четырех схемных функций по отношению к параметру ИТУН. Аналогичные схемы можно изобразить для параметров других управляемых источников: ИНУТ; источника напряжения, управляемого напряжением (ИНУН), и источника тока, управляемого током (ИТУТ).

Коэффициент передачи напряжения для схемы на рис. 2,а можно записать в виде

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\Delta_{(1+2)(3+4)}}{\Delta_{(1+2)(1+2)}} = \frac{\Delta_{(1+2)(3+4)}^0 + Y\Delta_{(1+2)(3+4),(7+8)(5+6)}}{\Delta_{(1+2)(1+2)}^0 + Y\Delta_{(1+2)(1+2),(7+8)(5+6)}} \quad (6)$$

В (6) используется формула выделения параметра ИТУН [8], в которой первое слагаемое находится при $Y=0$, на что указывает верхний индекс.

После подстановки (6) в формулу (1) и сокращения на $\Delta_{(1+2)(1+2)}$ получаем выражение для чувствительности коэффициента передачи напряжения по параметру ИТУН Y :

$$S_Y^K = \frac{Y(\Delta_{(1+2)(3+4),(7+8)(5+6)} \Delta_{(1+2)(1+2)}^-)}{\Delta_{(1+2)(1+2)} \Delta_{(1+2)(3+4)}} \rightarrow \frac{-\Delta_{(1+2)(3+4)} \Delta_{(1+2)(1+2),(7+8)(5+6)}}{\Delta_{(1+2)(1+2)} \Delta_{(1+2)(3+4)}} \quad (7)$$

Числитель в (7) можно преобразовать в произведение алгебраических дополнений с помощью тождества Якоби (3) при использовании МСАД $\Delta_{(1+2)(1+2)}$ вместо определителя Δ :

$$S_Y^K = \frac{Y(\Delta_{(1+2)(5+6)} \Delta_{(1+2)(1+2),(7+8)(3+4)})}{\Delta_{(1+2)(1+2)} \Delta_{(1+2)(3+4)}} \quad (8)$$

Вывод формул для чувствительности коэффициента передачи напряжения по параметрам других управляемых источников, а также формул для чувствительности других схемных функций аналогичен. При этом формулы чувствительности для одной схемной функции внешне отличаются только множителем — параметром УИ. Если параметр произвольного УИ обозначить χ , то получим обобщенную формулу чувствительности для коэффициента передачи напряжения в табл. 1, строка 1. Эта формула справедлива и для чувствительности передаточной проводимости (рис. 2,б):

$$Y_{пер} = I_2 / U_1 = \Delta_{(1+2)(3+4)} / \Delta_{(1+2)(1+2)}, \quad (9)$$

Таблица 1

№	Обозначение чувствительности	Формула
1	S_{χ}^K	$\frac{\chi \Delta_{(1+2)(5+6)} \Delta_{(1+2)(1+2),(7+8)(3+4)}}{\Delta_{(1+2)(1+2)} \Delta_{(1+2)(3+4)}}$
2	$S_{\chi}^{Y_{пер}}$	
3	S_{χ}^B	$\frac{\chi \Delta_{(1+2)(5+6)} \Delta_{(7+8)(3+4)}}{\Delta \Delta_{(1+2)(3+4)}}$
4	$S_{\chi}^{Z_{пер}}$	

которая совпадает с формулой (6). При этом схема для определения функции чувствительности $Y_{пер}$ на рис. 2,б отличается от схемы на рис. 2,а объединенными выходными полюсами.

Формулы для передаточного сопротивления и коэффициента передачи тока находятся по схемам на рис. 2,в и г и так же, как и формулы (6) и (9), совпадают между собой, отличаясь знаменателем Δ :

$$Z_{пер} = \frac{U_2}{I_1} = \Delta_{(1+2)(3+4)} / \Delta;$$

$$B = \frac{I_2}{I_1} = \Delta_{(1+2)(3+4)} / \Delta.$$

Тем же определителем отличаются формулы для чувствительностей B и $Z_{пер}$ в строках 3 и 4 от формул в строках 1 и 2 (табл. 1).

Знаменатель формул из табл. 1 является произведением знаменателя и числителя передаточной функции, а числитель – произведением числителей передаточных функций от входа к управляющей ветви и от управляемой ветви к выходу. Более сложную структуру имеют формулы для относительной чувствительности схемных функций 2-го порядка, которые получаются на основе повторного дифференцирования формул для относительной чувствительности 1-го порядка в табл. 1. Так, чувствительность 2-го порядка передаточного сопротивления по параметрам произвольных УИ χ_1 и χ_2 имеет вид (к схеме рис. 2,в добавлены управляющая и управляемая ветви УИ χ_2 с номерами полюсов 9, 10 и 11, 12):

$$S_{\chi_1 \chi_2}^{Z_{пер}} = \chi_1 \chi_2 \frac{\Delta_{(1+2)(5+6)} \Delta_{(7+8)(9+10)} \Delta_{(11+12)(3+4)} + \Delta_{(1+2)(9+10)} \Delta_{(11+12)(5+6)} \Delta_{(7+8)(3+4)}}{\Delta^2 \Delta_{(1+2)(3+4)}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\Delta_{(1+2)(5+6)} \Delta_{(7+8)(9+10)} \Delta_{(11+12)(3+4)} + \Delta_{(1+2)(9+10)} \Delta_{(11+12)(5+6)} \Delta_{(7+8)(3+4)}}{\Delta^2 \Delta_{(1+2)(3+4)}}. \quad (10)$$

Формула (10) содержит в знаменателе произведение квадрата определителя и числителя передаточной функции, а в числителе – сумму двух произведений. Первое произведение содержит числители передаточных функций от входа схемы к управляющей ветви первого УИ, от управляемой ветви первого УИ к управляющей ветви второго УИ и от управляемой ветви второго УИ к выходу

схемы. Во втором произведении порядок передачи входного воздействия через УИ противоположный – сначала сигнал поступает на второй УИ, а затем на первый.

Частные формулы для чувствительностей. Если в формуле из табл. 1 (строка 1) полюса 7 и 8 объединить попарно с полюсами 5 и 6, то получается формула для относительной чувствительности коэффициента передачи напряжения по двухполюсной проводимости Y [2]:

$$S_{\chi}^K = -Y \frac{\Delta_{(1+2)(5+6)} \Delta_{(1+2)(1+2),(5+6)(3+4)}}{\Delta_{(1+2)(1+2)} \Delta_{(1+2)(3+4)}}.$$

Если в той же формуле чувствительности положить $\chi = Y$, а узлам 2, 4, 6, 8 присвоить номер 0 (заземлить ИТУН, входную и выходную стороны схемы на рис. 2,а), то эта формула сводится к (2) при $W = Y$ и $\Delta = \Delta_{11}$. Аналогично при $\chi = Y$ (для ИНУТ) формула чувствительности коэффициента передачи напряжения в табл. 1, строка 1, сводится также к (2).

Частные формулы для схемных функций по двухполюсному сопротивлению Z , включенному между узлами 5 и 7, получаются из формул для ИНУТ ($\chi = Z$) в табл. 1 путем замены индекса 8 на 6. Формулы для чувствительности входной проводимости и входного сопротивления находятся из формул для чувствительности передаточной проводимости и передаточного сопротивления (строки 2 и 4, табл. 1) путем замены индексов 3 и 4 на 1 и 2 соответственно.

Формулы для чувствительности схем с топологическими особенностями. Если выходное напряжение снимается с генератора ИНУН или ИНУТ, то в формулах чувствительности K и $Z_{пер}$ по μ и Z в строках 1 и 4, табл. 1, совпадают индексы МСАД $3 \equiv 7$ и $4 \equiv 8$. При этом из них следуют формулы в строках 1 и 2, табл. 2, содержащие всего два МСАД.

При выводе этих формул учитывается тождество $\chi \Delta_{(1+2)(5+6)} = \Delta_{(1+2)(7+8)}$, где $\chi = \mu$ и $\chi = Z$ для ИНУН и ИНУТ соответственно. Здесь МСАД яв-

ляются числителями передачи от входа к приемнику и генератору УИ. Они связаны параметром УИ. Аналогично получаются формулы с двумя МСАД для чувствительности передаточной проводимости $Y_{пер}$ и коэффициента передачи тока B по параметру ИТУН Y и ИТУТ β в строках 3 и 4, табл. 2, для схем, в которых выходной переменной является ток генератора ИТУН и ИТУТ. Эти формулы следуют из формул в строках 2 и 3, табл. 1.

В дуальном случае входная переменная подается непосредственно на управляющую ветвь УИ. При этом формулы с двумя МСАД (строки 5–8, табл. 2) следуют из табл. 1 при учете эквивалентности полюсов $1 \equiv 5$ и $2 \equiv 6$.

Другие формулы с двумя МСАД, получаемые на основе табл. 1, сведены в табл. 3.

Пример. Требуется построить символическое выражение для чувствительности комплексного коэффициента передачи напряжения $K = U_2 / U_1$ по параметру ИНУН μ схемы на рис. 3 [6].

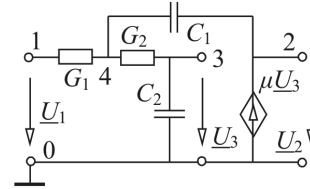


Рис. 3. Схема фильтра для примера нахождения функции чувствительности

Таблица 2

Формулы чувствительности для схем со съемом отклика с генератора управляемого источника и подачей воздействия на вход управляемого источника

№	Обозначение чувствительности		Формула
	Схема	Схема	
1			$\frac{\Delta_{(1+2)(1+2),(3+4)(3+4)}}{\Delta_{(1+2)(1+2)}}$
2			$\frac{\Delta_{(3+4)(3+4)}}{\Delta}$
3			$\frac{\Delta_{(1+2)(1+2)}^0}{\Delta_{(1+2)(1+2)}}$
4			$\frac{\Delta^0}{\Delta}$
5			$\mu \frac{\Delta_{(1+2)(1+2),(7+8)(3+4)}}{\Delta_{(1+2)(3+4)}}$
6			$Y \frac{\Delta_{(1+2)(1+2),(7+8)(3+4)}}{\Delta_{(1+2)(3+4)}}$
7			$Z \frac{\Delta_{(7+8)(3+4)}}{\Delta_{(1+2)(3+4)}}$
8			$\beta \frac{\Delta_{(7+8)(3+4)}}{\Delta_{(1+2)(3+4)}}$

Таблица 3

Формулы чувствительности для схем с генератором УИ на входе схемы или с управляемой ветвью УИ на выходе

№	Обозначение чувствительности		Формула
	Схема	Схема	
1			$- Y \frac{\Delta_{(1+2)(5+6)}}{\Delta}$
2			$- \mu \frac{\Delta_{(1+2)(5+6)}}{\Delta_{(1+2)(1+2)}}$
3			$- \beta \frac{\Delta_{(1+2)(5+6)}}{\Delta}$
4			$- Z \frac{\Delta_{(1+2)(5+6)}}{\Delta_{(1+2)(1+2)}}$
5			$- \chi \frac{\Delta_{(1+2)(1+2), (7+8)(3+4)}}{\Delta_{(1+2)(1+2)}}$
6			$- \chi \frac{\Delta_{(7+8)(3+4)}}{\Delta}$
7			$- \chi \frac{\Delta_{(1+2)(1+2), (7+8)(3+4)}}{\Delta_{(1+2)(1+2)}}$
8			$- \chi \frac{\Delta_{(7+8)(3+4)}}{\Delta}$

Выходное напряжение снимается с генератора ИНУН, поэтому целесообразно использовать формулу из строки 1, табл. 2. С учетом нумерации полюсов схемы на рис. 3 эта формула принимает вид:

$$S_{\mu}^K = \Delta_{(1+0)(1+0)(2+0)(2+0)} / \Delta_{(1+0)(1+0)} = \Delta_{11,12} / \Delta_{11} \quad (11)$$

Для раскрытия МСАД в (11) используем метод схемных определителей [8, 9]. Выделим в знаменателе параметр ИНУН:

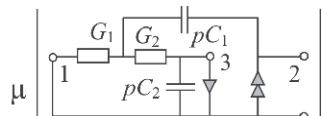
$$\Delta_{11} = \mu \left[\begin{array}{c} \text{Circuit 1} \\ \text{Circuit 2} \end{array} \right] \quad (12)$$

Второе слагаемое в (12) совпадает с числителем (11). Для получения его выражения в полиномиальном виде, удобном для аналитического исследования, используем разложение по проводимостям конденсаторов:

$$\Delta_{11,22} = p^2 C_1 C_2 \left[\begin{array}{c} \text{Circuit 1} \\ \text{Circuit 2} \end{array} \right] - p \left\{ \left[\begin{array}{c} \text{Circuit 1} \\ \text{Circuit 2} \end{array} \right] + C_2 \left[\begin{array}{c} \text{Circuit 1} \\ \text{Circuit 2} \end{array} \right] \right\} + \left[\begin{array}{c} \text{Circuit 1} \\ \text{Circuit 2} \end{array} \right] = p^2 C_1 C_2 + p [C_1 G_2 + C_2 (G_1 + G_2)] + G_1 G_2 \quad (13)$$

Схемы в (13) получены из схемы во втором слагаемом (12) путем замены конденсатора идеальным

проводником и удаления его при выделении и обнулении его параметра соответственно. Определитель первой схемы равен единице, поскольку обе проводимости замкнуты накоротко. Во второй схеме выделяется разомкнутая проводимость G_2 , а проводимость G_1 , как и в первой схеме, образует контур, и ее определитель равен единице. В третьей схеме определитель параллельного соединения проводимостей равен их сумме, а в четвертой схеме определитель последовательного разомкнутого соединения проводимостей — произведению этих проводимостей.



$$\mu \left| \begin{array}{c} \text{Circuit Diagram} \end{array} \right| = -\mu p C_1 G_2. \quad (14)$$

Первое слагаемое из (12)

Символьное выражение в (14) найдено с помощью следующих операций: удаления проводимости pC_2 , параллельной нуллатору; выделения проводимости G_2 , последовательной с нуллатором; удаления проводимости G_1 , параллельной нуллатору, и замены определителя схемы в виде встречного параллельного соединения норатора и нуллатора значением, равным -1 .

После подстановки символьных выражений из (13) и (14) в (12) и (11) получается искомая функция чувствительности:

$$S_{\mu}^K = \frac{p^2 C_1 C_2 + p[C_1 G_2 + C_2(G_1 + G_2)] + G_1 G_2}{p^2 C_1 C_2 + p[(1 - \mu)C_1 C_2 + C_2(G_1 + G_2)] + G_1 G_2}. \quad (15)$$

В (15) в отличие от решения [5] отсутствуют сокращающиеся множители за счет использования специальной формулы из строки 1, табл. 2, что приводит к сокращению процесса решения вдвое. Благодаря применению для раскрытия МСАД метода схемных определителей в предложенном решении отсутствуют взаимно уничтожающиеся слагаемые, присущие традиционной матричной методике [1–3, 6, 7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боде Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью/Пер. с англ.— М.: Государственное издательство иностранной литературы, 1948, 641 с.
2. Сигорский В.П., Петренко А.И. Алгоритмы анализа электронных схем. — М.: Советское радио, 1976, 608 с.
3. Калниболотский Ю.М., Казанджан Н.Н., Нестер В.В. Расчет чувствительности электронных схем. — Киев: Техника, 1982, 176 с.
4. Hoang S. The direct topological method in network sensitivity analysis. — Rozprawy elektrotechniczne, 1975, т. 21, з. 4, pp. 767–784.
5. Бондаренко А.В., Курганов С.А., Филаретов В.В. Формулы для анализа чувствительности схемных функций линейных электрических цепей. — Синтез, анализ и диагностика электронных цепей (Международный сборник научных трудов). — Ульяновский государственный технический университет, 2013, вып. 11, с. 79–96.
6. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем/Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1988, 560 с.
7. Asenova I.N. Calculation of first-, second-order and multiparameter symbolic sensitivity of active circuits by using nullor model and modified Coates flow graph. — International Journal of microelectronics and computer science, 2011, vol. 2, No. 4, pp. 129–135.
8. Филаретов В.В. Топологический анализ электронных схем методом выделения параметров. — Электричество, 1998, № 5, с. 43–52.
9. Филаретов В.В. Разложение многократных суммарных и разностных алгебраических дополнений методом схемных определителей. — Синтез, анализ и диагностика электронных цепей (Международный сборник научных трудов). — Ульяновский государственный технический университет, 2013, вып. 11, с. 191–212.

[27.10.2016]

А в т о р ы: 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». 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». Профессор кафедры «Электроснабжение» УГТУ.

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 2, pp. 44–50.

Generalized Breakeven Formula for the Sensivity of Circuit Functions of Linear Electric Circuits

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.)

Formulas to get the symbolic functions of the relative sensitivity are generalized on arbitrary parameters using higher order summative cofactors (HOSC). Expansion of the HOSC by the method of circuit

determinants reduces the amount of calculations for formation free-cancelled expressions. Accounting topological features of circuits leads to a twofold reduction in the number of the HOSC in sensitivity expressions.

Key words: *network function, relative sensitivity, the Jacobi identity, higher order summative cofactors, circuit determinant*

REFERENCES

1. **Bode G.** *Teoriya tsepei i proyektirovaniya usilitelei s obratnoi svyaz'yu/Per. s angl.* (The theory and design of circuits with feedback amplifiers / Transl. from English). Moscow, State Publ. of Foreign Literature, 1948, 641 p.
2. **Sigorskii V.P., Petrenko A.I.** *Algoritmy analiza elektronnykh skhem* (Algorithms analysis of electronic circuits). Moscow, Publ. «Sovetskoye radio», 1976, 608 p.
3. **Kalnibolotskii Yu. M., Kazandzhan N.N., Nester V.V.** *Raschet chuvstvitel'nosti elektronnykh skhem* (Calculation of sensitivity of the electronic circuits). Kiev, Publ. «Tekhnika», 1982, 176 p.
4. **Hoang S.** The direct topological method in network sensitivity analysis. — *Rozprawy elektrotechniczne*, 1975, т. 21, з. 4, pp. 767–784.
5. **Bondarenko A.V., Kurganov S.A., Filaretov V.V.** *Mezhdunarodnyi sbornik nauchnykh trudov «Sintez, analiz i diagnostika elektronnykh tsepei», — in Russ.* (Intern. collection of scientific papers «Synthesis, analysis and diagnostics of electronic circuits»). Ulyanovsk State Technical University, 2013, iss. 11, pp. 79–96.
6. **Vlakh I., Singkhal K.** *Mashinnye metody analiza i proyektirovaniya elektronnykh skhem/Per. s angl.* (Machine methods of analysis and design of electronic circuits/Transl. from English). Moscow, Publ. «Radio i svyaz'» 988, 560 p.
7. **Asenova I.N.** Calculation of first-, second-order and multiparameter symbolic sensitivity of active circuits by using nullor model and modified Coates flow graph. — *International Journal of microelectronics and computer science*, 2011, vol. 2, No. 4, pp. 129–135.
8. **Filaretov V.V.** *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1998, No. 5, pp. 43–52.
9. **Filaretov V.V.** *Mezhdunarodnyi sbornik nauchnykh trudov «Sintez, analiz i diagnostika elektronnykh tsepei» — in Russ.* (Intern. collection of scientific papers «Synthesis, analysis and diagnostics of electronic circuits»). Ulyanovsk State Technical University », 2013, iss. 11, pp. 191–212.