

Исключение избыточных слагаемых и множителей в разностных выражениях чувствительности для линейных электрических цепей

КУРГАНОВ С.А., НЕДОРЕЗОВ М.В., ФИЛАРЕТОВ В.В.

Предложены формулы для одновременного выделения одноименных параметров (сопротивлений, проводимостей, управляемых источников напряжения и тока) в отношениях и разностях схемных определителей. Эти формулы применяются при формировании дробно-рациональных выражений без взаимно умножающихся слагаемых и избыточных множителей. При выделении одинаковых параметров из отношения схемных определителей исключаются избыточные множители в числителе и знаменателе функции чувствительности, а при выделении из разности происходит локализация (группировка) одинаковых слагаемых с противоположными знаками, что позволяет удалить их без дополнительных затрат. Разработан алгоритм получения безыбыточных символьных выражений чувствительности, который предназначен для любых схемных функций – передаточных функций по напряжению и току, передаточных и входных сопротивлений и проводимостей. Рассмотрен пример формирования безыбыточной функции чувствительности для активного фильтра нижних частот. Проведено сравнение функций чувствительности, полученных по разностной формуле, обобщенной формуле Боде и предлагаемому алгоритму.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрические цепи, схемная функция, относительная чувствительность, выделение параметров, избыточные множители

Формулы для получения относительной чувствительности в аналитическом виде. Относительной чувствительностью называют отношение изменения схемной функции F к соответствующему изменению параметра W элемента схемы [1]:

$$S = \frac{dF}{F} \frac{W}{dW}. \tag{1}$$

Формулы в виде отношения произведений двух пар определителей следуют из выражения (1) с помощью теоремы Якоби. Для коэффициента $K = U_3 / U_1$ передачи напряжения Y -схемы с заземленными элементами (рис. 1,а) формула чувствительности предложена в [1]:

$$S_Y^K = -Y \frac{\Delta_{15} \Delta_{11,73}}{\Delta_{11} \Delta_{13}}, \tag{2}$$

где Y – варьируемая проводимость источника тока, управляемого напряжением (ИТУН); Δ_{11} , Δ_{15} , Δ_{13} , $\Delta_{11,73}$ – алгебраические дополнения узловой матрицы.

В формуле (2) отсутствуют разности определителей, что позволяет получить символьные выражения без избыточных слагаемых – одинаковых выражений с противоположными знаками. Формула (2) справедлива только для Y -схем с заземленными элементами и для дуальных Z -схем [1].

Обобщение формулы (2) для всех типов передаточных функций и электрических цепей с произвольными линейными элементами выполнено на основе метода схемных определителей [2] и много-

кратных суммарных алгебраических дополнений (МСАД) [3, 4]. Например, формула чувствительности коэффициента передачи напряжения $K = U_2 / U_1$ для схемы на рис. 1,б по параметру Y незаземленного ИТУН имеет вид [3]:

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

где Δ – определитель исходной схемы; $\Delta_{(1+2)(1+2)}$, $\Delta_{(1+2)(3+4)}$ – определители коэффициента передачи напряжения.

Раскрытие МСАД формул вида (3) и получение символьных выражений чувствительности выполняется методом схемных определителей (МСО), который в отличие от матричных методов не образует пар избыточных, равных по модулю, но противоположных по знаку слагаемых [2]. Для экономии вычислительных операций и получения компактных выражений используются формулы бисекции [2, 4].

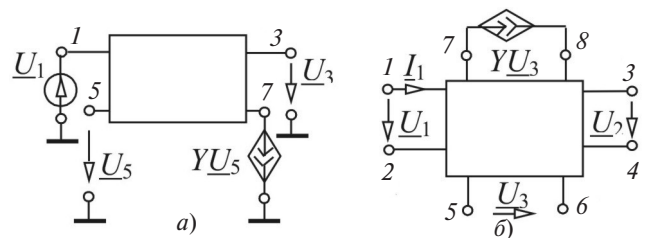


Рис. 1. Схемы для определения чувствительности по параметру ИТУН: а – с заземленными полюсами; б – незаземленными

Недостатком формул вида (3) является возможность образования избыточных множителей, общих для числителя и знаменателя выражения относительной чувствительности. Кроме того, эти формулы в отличие от разностных формул относительной чувствительности [5, 6] требуют нахождения не только определителей числителя и знаменателя исследуемой передаточной функции, но и дополнительных определителей, например $\Delta_{(1+2)(5+6)}$ и $\Delta_{(1+2)(1+2),(7+8)(3+4)}$ в формуле (3).

Разностные формулы чувствительности, содержащие разность отношений или произведений определителей [5, 6]. Эти формулы следуют непосредственно (без преобразования Якоби) из определения относительной чувствительности (1). При явном выделении варьируемого параметра W получаются разностные формулы, предусматривающие раскрытие вместо четырех определителей в (3) только двух – числителя N и знаменателя D соответствующей схемной функции [5]:

$$S_W^F = W \frac{N_1 D - N D_1}{ND}; \quad (4)$$

$$S_W^F = W \frac{N D_2 - N_2 D}{ND}. \quad (5)$$

Здесь N_1, N_2, D_1 и D_2 – части числителя и знаменателя схемной функции, которые получаются при выделении параметра W по [2]:

$$\left. \begin{aligned} N &= W N_1 + N_2; \\ D &= W D_1 + D_2. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Недостатком формул (4) и (5) по сравнению с формулами Боде является наличие характерных для разностных выражений одинаковых слагаемых с противоположными знаками, что может усложнить выражение в несколько раз и увеличить погрешность вычислений.

Можно значительно уменьшить число избыточных слагаемых, если в числителе (4) заменить N и D на выражения (6). После удаления образовавшихся одинаковых слагаемых с противоположными знаками получается «экономное» выражение для чувствительности [6]:

$$S_W^F = \frac{N_S}{D_S} = W \frac{N_1 D_2 - N_2 D_1}{ND}. \quad (7)$$

Однако выражение (7) по-прежнему нельзя считать оптимальным [7, 8] не только из-за наличия взаимно уничтожающихся слагаемых, число которых сопоставимо с числом слагаемых, остающихся после приведения подобных. В (7), как и в формулах вида (3), могут образоваться избыточные множители.

Чтобы исключить в выражениях чувствительности как сокращающиеся множители, так и взаимно уничтожающиеся слагаемые предлагается одновременное выделение одноименных параметров в формуле (7).

Формулы выделения одноименных параметров в отношениях и разностях схемных определителей. Такие формулы представляют интерес, если параметр выделяется в числителе и знаменателе по формуле (6) при нулевом втором слагаемом. В этом случае выделяемый параметр сокращается в числителе и знаменателе формулы. При этом формулы выделения параметра из отношения определителей для управляемого источника (УИ) с параметром χ , двухполюсного сопротивления Z и проводимости Y имеют вид:

$$T = \frac{A}{B} = \frac{A_{(\chi \rightarrow \text{нуллор})}}{B_{(\chi \rightarrow \text{нуллор})}}; \quad (8)$$

$$T = \frac{A}{B} = \frac{A^Z}{B^Z}; \quad (9)$$

$$T = \frac{A}{B} = \frac{A_Y}{B_Y}, \quad (10)$$

где A и B – схемные определители числителя и знаменателя; $\chi \rightarrow \text{нуллор}$ означает преобразование УИ в нуллор, а верхний и нижний индексы Z и Y – удаление сопротивления Z и стягивание (замену проводником) проводимости Y .

Формулы выделения из разности схемных определителей для УИ с параметром χ , двухполюсного сопротивления Z и проводимости Y имеют вид соответственно:

$$P = M - N = \chi (M_{\chi \rightarrow \text{нуллор}} - N_{\chi \rightarrow \text{нуллор}}) + M_{\chi=0} - N_{\chi=0}; \quad (11)$$

$$P = M - N = Z (M^Z - N^Z) + M_Z - N_Z; \quad (12)$$

$$P = M - N = Y (M_Y - N_Y) + M^Y - N^Y, \quad (13)$$

где M и N – определители уменьшаемого и вычитаемого.

Формулы (11)–(13) дают практический эффект, поскольку при их рекурсивном использовании или реализации в программе избыточные слагаемые локализуются (оказываются в выражении рядом), поэтому могут быть взаимно уничтожены. Подобным образом происходит локализация избыточных слагаемых в миноре унисторного графа при первоочередном выделении пассивных элементов [7], когда взаимно уничтожающиеся слагаемые образуются не в двух, а в одном схемном миноре.

Формулы выделения из разности схемных миноров следует применять после формул выделения параметров из отношения схемных миноров. Правила выбора выделяемых элементов используются такие же, как и при формировании компактных и экономичных символьных выражений для схемных функций [8]. В первую очередь выделяются или нейтрализуются параметры, входящие в наибольшее число слагаемых.

Алгоритм формирования безыбыточных функций чувствительности на основе обобщенного выделения параметров. Формула (7) малоприспособна для символьного анализа, если раскрывать входящие в нее схемные определители традиционно — один за другим, не обращая внимания на их отличия [2]. При этом образуются как избыточные множители в числителе и знаменателе формулы, так и избыточные одинаковые слагаемые с противоположными знаками. Не допустить их образования можно с помощью формул (8)–(13) для выделения одноименных параметров из отношений и разностей схемных определителей, применяя следующий алгоритм.

А. Построить САФ по формуле (7), которая для чувствительности коэффициента передачи напряжения схемы (рис. 1,б) по проводимости ИТУН имеет вид:

$$S_Y^K = Y \left(\begin{array}{c} \left| \begin{array}{cc} \begin{array}{c} N_1 \\ \text{[Circuit Diagram]} \end{array} & \begin{array}{c} D_2 \\ \text{[Circuit Diagram]} \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} N_2 \\ \text{[Circuit Diagram]} \end{array} & \begin{array}{c} D_1 \\ \text{[Circuit Diagram]} \end{array} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \begin{array}{c} N \\ \text{[Circuit Diagram]} \end{array} & \begin{array}{c} D \\ \text{[Circuit Diagram]} \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} N \\ \text{[Circuit Diagram]} \end{array} & \begin{array}{c} D \\ \text{[Circuit Diagram]} \end{array} \end{array} \right) \end{array} \right) \quad (14)$$

Схема числителя N (знаменателя D) схемной функции получена в (14) из схемы на рис. 1,б путем подключения норатора и нуллатора к входу и выходу (к входу) схемы. Схемы частей числителя N_1 и N_2 (знаменателя D_1 и D_2) сформированы из схемы числителя N (знаменателя D) путем замены ИТУН нуллором и удаления его из схемы.

Б. Используя формулы выделения (8)–(10) из отношения схемных определителей, выделить общий множитель из триады N_1, N_2, N . Эту же операцию выполнить применительно к триаде D_1, D_2, D .

В. По частному варианту формул (6) с нулевым первым слагаемым нейтрализовать соответствующие параметры в триаде N_1, N_2, N . Выполнить эти же операции применительно к триаде D_1, D_2, D .

Г. Выделить одноименные параметры из пар N_1, D_2 и N_2, D_1 по формулам вида (11)–(13).

Д. Удалить образовавшиеся в парах N_1, D_2 и N_2, D_1 одинаковые схемные миноры с противоположными знаками.

Е. Раскрыть оставшиеся схемные миноры в (14).

Пункты А–Е выполняются для значений чувствительности произвольных схемных функций относительно любых варьируемых параметров.

Пример построения с помощью предлагаемого алгоритма безыбыточной функции чувствительности активного фильтра. Схема фильтра представлена на рис. 2 [9]. Операционный усилитель (ОУ) моделируется с помощью источника напряжения, управляемого напряжением, с действительным коэффициентом передачи напряжения k . Требуется получить функцию относительной чувствительности $S_{R_{11}}^K$ коэффициента $K = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$ передачи напряжения при варьировании сопротивления R_{11} .

1. Формула чувствительности (7) в виде схемно-алгебраического выражения в соответствии с п. А алгоритма:

$$S_{R_{11}}^K = \frac{R_{11} \left(\begin{array}{c} \left| \begin{array}{cc} \begin{array}{c} N_1 \\ \text{[Circuit Diagram]} \end{array} & \begin{array}{c} D_2 \\ \text{[Circuit Diagram]} \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} N_2 \\ \text{[Circuit Diagram]} \end{array} & \begin{array}{c} D_1 \\ \text{[Circuit Diagram]} \end{array} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \begin{array}{c} N \\ \text{[Circuit Diagram]} \end{array} & \begin{array}{c} D \\ \text{[Circuit Diagram]} \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} N \\ \text{[Circuit Diagram]} \end{array} & \begin{array}{c} D \\ \text{[Circuit Diagram]} \end{array} \end{array} \right) \end{array} \right) \quad (15)$$

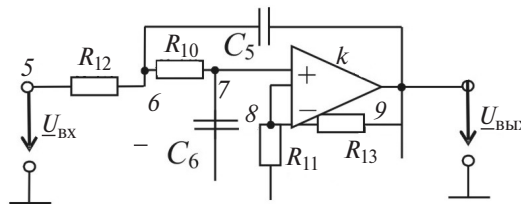


Рис. 2. Схема активного фильтра нижних частот для нахождения чувствительности коэффициента передачи напряжения по сопротивлению R_{11}

Здесь схемы частей знаменателя D_1 и D_2 (числителя N_1 и N_2) сформированы из схемы знаменателя D (числителя N) путем удаления сопротивления R_{11} и замены его проводником.

2. Триада N_1, N_2, N указывает на общий множитель k в (15), который игнорируется по формуле (8) выделения параметра из отношения определителей (п. Б алгоритма). В триаде D_2, D_1, D нет общего множителя.

3. Следуя п. В алгоритма, применим к числителю (15) частные формулы выделения параметров с одним слагаемым: формулу нейтрализации сопротивления R_{12} , последовательного с норатором; выделения параметра k ИНУН, параллельного нуллатору; замены параллельного соединения норатора и нуллатора проводником; удаления конденсатора C_5 , параллельного норатору; замены проводником резисторов R_{10} и R_{13} , последовательных норатору и приемнику напряжения U ; удаления последовательного соединения норатора и нуллатора. В результате получим следующее выражение числителя функции чувствительности:

$$N_s = R_{11} \left(\left| \begin{array}{c} R_{12} \quad R_{10} \quad C_5 \\ \hline 6 \quad 7 \quad 9 \\ \hline C_6 \quad U \quad kU \\ 8 \quad 0 \end{array} \right|_{D_2} - R_{13} \left| \begin{array}{c} R_{12} \quad R_{10} \quad C_5 \\ \hline 6 \quad 7 \quad 9 \\ \hline C_6 \quad U \quad kU \\ 8 \quad 0 \end{array} \right|_{D_1} \right), \quad (16)$$

где необозначенные части числителя схемной функции $N_1 = 1$ и $N_1 = R_{13}$.

4. Выделяем сопротивление R_{13} по (12): выделение параметра из разности определителей (п. Г алгоритма), при этом числитель чувствительности (16) преобразуется к виду:

$$N_s = R_{11} R_{13} \left(\left| \begin{array}{c} R_{12} \quad R_{10} \quad C_5 \\ \hline 6 \quad 7 \quad 9 \\ \hline C_6 \quad U \quad kU \\ 8 \quad 0 \end{array} \right|_{D_2} - \left| \begin{array}{c} R_{12} \quad R_{10} \quad C_5 \\ \hline 6 \quad 7 \quad 9 \\ \hline C_6 \quad U \quad kU \\ 8 \quad 0 \end{array} \right|_{D_1} \right). \quad (17)$$

5. Выделяем из разности определителей (17) параметр ИНУН k по формуле (11):

$$N_s = R_{11} R_{13} \left(k \left(\left| \begin{array}{c} R_{10} \quad C_5 \\ \hline 6 \quad 7 \quad 9 \\ \hline C_6 \quad U \quad kU \\ 8 \quad 0 \end{array} \right|_{D_2} - \left| \begin{array}{c} R_{10} \quad C_5 \\ \hline 6 \quad 7 \quad 9 \\ \hline C_6 \quad U \quad kU \\ 8 \quad 0 \end{array} \right|_{D_1} \right) + \left| \begin{array}{c} R_{10} \quad C_5 \\ \hline 6 \quad 7 \quad 9 \\ \hline C_6 \quad U \quad kU \\ 8 \quad 0 \end{array} \right|_{D_2} - \left| \begin{array}{c} R_{10} \quad C_5 \\ \hline 6 \quad 7 \quad 9 \\ \hline C_6 \quad U \quad kU \\ 8 \quad 0 \end{array} \right|_{D_1} \right)$$

6. Удалим (п. Д алгоритма) пару одинаковых схемных миноров с противоположными знаками, раскроем оставшиеся определители, получим символическое безыбыточное выражение для числителя чувствительности:

$$N_s = -kR_{11}R_{13}[y_5R_{12} + y_6(y_5R_{10}R_{12} + R_{10} + R_{12}) + 1], \quad (18)$$

где $y_5 = pC_5$, $y_6 = pC_6$ – проводимость конденсаторов; p – комплексный оператор.

7. Раскроем по п. Е алгоритма один из схемных миноров, удаленных в D_1 и D_2 из формулы (17), в результате знаменатель схемной функции имеет вид:

$$D = (R_{11} + R_{13})[(R_{12}y_5 + 1)(R_{10}y_6 + 1) + y_6R_{12}] + k\{R_{11}[y_6(y_5R_{10}R_{12} + R_{10} + R_{12}) + 1] - R_{12}R_{13}y_5\}. \quad (19)$$

Отсюда с учетом (18) и частей числителя N_1 и N_2 в (16) получаем безыбыточное выражение чувствительности:

$$S_{R_{11}}^K = -\frac{kR_{11}R_{13}[y_3R_{12} + y_6(y_5R_{10}R_{12} + R_{10} + R_{12}) + 1]}{(R_{11} + R_{13})D}. \quad (20)$$

Функция (20) не содержит как избыточных слагаемых, так и сокращающихся множителей.

Сравнение предлагаемой формулы без избыточных множителей и слагаемых с известными формулами чувствительности. По разностной формуле (7) [6], используя правила МСО, получаем выражение для числителя чувствительности:

$$N_S = kR_{11}R_{13}\{y_5R_{12}(y_6R_{10} - k + 1) + y_6(R_{12} + R_{10}) + 1 -$$

$$-y_5R_{12}[(y_6R_{10}(k+1)+1) - [y_6(R_{12}+R_{10})(k+1)+k+1]], \quad (21)$$

содержащее 15 слагаемых, две трети из которых избыточные – это пять пар одинаковых слагаемых с противоположными знаками (множители избыточных слагаемых выделены жирным шрифтом).

Знаменатель формулы чувствительности (7) с учетом выделенного в N коэффициента k найденных ранее в (16) выражений N_1 и N_2 и формулы (19) имеет вид:

$$D_S = k(R_{11} + R_{13})D. \quad (22)$$

Как видно из (21) и (22), функция чувствительности по формуле (7) имеет не только избыточные слагаемые, но и сокращающийся в числителе и знаменателе избыточный множитель k . После его удаления, развертывания числителя (21), приведения подобных членов и последующего свертывания получаем безыбыточное выражение, совпадающее с выражением числителя (18), полученным по предлагаемым формулам выделения одноименных параметров из нескольких определителей. Таким образом, для получения безыбыточной функции чувствительности по формуле (7) требуется в отличие от предлагаемых формул выполнение дополнительных трудоемких операций.

По обобщенной формуле Боде вида (3) [3]

$$S_{R_{11}}^K = R_{11} \frac{\Delta_{(5+0)(8+0)} \Delta_{(5+0)(5+0),(8+0)(9+0)}}{\Delta_{(5+0)(5+0)} \Delta_{(5+0)(9+0)}} \quad (23)$$

МСАД числителя имеют вид: $\Delta_{(5+0)(8+0)} = k$; $\Delta_{(5+0)(5+0),(8+0)(9+0)} = -kR_{13}[y_5 R_{12} + y_6(y_5 R_{10} R_{12} + R_{10} + R_{12}) + 1]$; МСАД знаменателя: $\Delta_{(5+0)(9+0)} = k(R_{11} + R_{13})$; $\Delta_{(5+0)(5+0)}$ совпадает с ранее найденным выражением D .

При подстановке символьных выражений МСАД в формулу (23) получается функция чувствительности, содержащая в числителе и знаменателе избыточный множитель k . После сокращения множителя k получается безыбыточная функция чувствительности, совпадающая с выражением (20), найденным по предлагаемым формулам. Однако построение функции по формуле Боде является более трудоемким, поскольку требуется раскрыть не только определители числителя (МСАД $\Delta_{(5+0)(8+0)}$) и знаменателя (МСАД $\Delta_{(5+0)(5+0),(8+0)(9+0)}$) исследуемой схемной функции, но и два дополнительных определителя в числителе (23).

Выводы. 1. Избыточные слагаемые в разностной формуле чувствительности образуются при наличии одинаковых слагаемых с варьируемым параметром в числителе и знаменателе исследуемой схемной функции, а избыточные множители обусловлены множителями без варьируемого парамет-

ра в числителе и(или) знаменателе схемной функции.

2. Предложенное формирование разностных выражений чувствительности без вычислительной избыточности путем одновременного выделения одноименных параметров приводит к локализации одинаковых схемных миноров с противоположными знаками. При этом используется всего два определителя – числитель и знаменатель исследуемой схемной функции – в отличие от четырех определителей по обобщенной формуле Боде [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боде Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью/ Пер. с англ. М.: ГИИЛ, 1948, 641 с.
2. Филаретов В.В. Топологический анализ электронных схем методом выделения параметров. – Электричество, 1998, № 5, с. 43–52.
3. Курганов С.А., Филаретов В.В. Обобщенные безыбыточные формулы для чувствительности схемных функций линейных электрических цепей. – Электричество, 2017, № 2, с. 44–50.
4. Курганов С.А., Недорезов М.В., Филаретов В.В. Анализ чувствительности каскадных электронных схем делением их на части. – Международ. сб. науч. тр. «Синтез, анализ и диагностика электронных цепей». Ульяновск: УлГТУ, 2018, вып. 15, с. 64–76.
5. Hoang S. Direct topological method in network sensitivity analysis. – Archiwum Elektrotechniki, 1975, vol. 21, iss. 4, pp. 767–784.
6. Тимкин Ю.В. Анализ электронных схем методом двуправленных графов. М.: Энергоатомиздат, 1985, 256 с.
7. Филаретов В.В. Топологический анализ электронных схем методом выделения ветвей и дуг. – Электричество, 1992, № 7, с. 31–37.
8. Филаретов В.В. Синтез оптимальных формул схемных функций электрических цепей. – Электричество, 1995, № 4, с. 36–43.
9. Mandache L., Iordache M., Dumitriu L., Sirbu I., Nicolae D. Sensitivity analysis of analog circuits based on a modified nodal approach. Proc. of Intern. Conf. on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, May 22–24, 2014, Moieciu, Romania, pp. 83–88.

[10.06.2019]

А в т о р ы: Курганов Сергей Александрович – доктор техн. наук, профессор Ульяновского государственного технического университета (УГТУ), диссертацию защитил в 2006 г.

Недорезов Максим Владимирович – аспирант Национального исследовательского университета «Московский физико-технический институт».

Филаретов Владимир Валентинович – доктор техн. наук, профессор УГТУ, диссертацию защитил в 2002 г.

Eliminating Excessive Summands and Multipliers in the Difference Sensitivity Expressions for Linear Electric Circuits

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

NEDORESOV Maxim V. (*National Research University «Moscow Physical and Technical Institute»*) – Ph. D.-student

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

Formulas for simultaneously separating homogeneous parameters (resistances, conductances, and controlled voltage and current sources) in the ratios and differences of circuit determinants are proposed. These formulas are used in constructing rational fractional expressions without mutually eliminating summands and excess multipliers. In separating identical parameters from the ratio of circuit determinants, excess multipliers in the numerator and denominator of the sensitivity function are eliminated, and in separating them from the difference, identical summands with the opposite signs are localized (grouped), due to which they can be eliminated without applying additional computation efforts. An algorithm for obtaining non-excess symbolic sensitivity expressions is developed, which is intended to be used for any circuit functions, including the transfer functions for voltage and current, and for mutual and input resistances and conductances. An example of constructing a non-excess sensitivity function for an active low-pass filter is considered. The sensitivity functions obtained using the difference formula, the generalized Bode formula, and the proposed algorithm are compared.

Key words: *electric circuits, circuit function, relative sensitivity, separation of parameters, excess multipliers*

REFERENCES

1. **Bode G.** *Teoriya tsepei i proektirovaniye usilitelei s obratnoi svyaz'yu/Per. s angl.* (Theory of Chains and Planning of Strengtheners Ticker-Coil/Trans. from Eng.). Moscow, GIIIL, 1948, 641 p.
2. **Filaretov V.V.** *Electrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1998, No. 5, pp. 43–52.
3. **Kurganov S.A., Filaretov V.V.** *Electrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 2, pp. 44–50.
4. **Kurganov S.A., Nedorezov M.V., Filaretov V.V.** *Mezhdunarod. sb. nauch. tr. «Sintez, analiz i diagnostika elektronnykh tsepei»* (Intern. collection of scientific papers «Synthesis, analysis and diagnosis of electronic circuits»). Ul'yanovsk State Technical University, 2018, iss. 15, pp. 64–76.
5. **Hoang S.** Direct topological method in network sensitivity analysis. — *Archiwum Elektrotechniki*, 1975, vol. 21, iss. 4, pp. 767–784.
6. **Timkin Yu.V.** *Analiz elektronnykh skhem metodom dvunapravlennykh grafov* (Analysis of electronic circuits by the method of bi-directional graphs). Moscow, Energoatomizdat, 1985, 256 p.
7. **Filaretov V.V.** *Electrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1992, No. 7, pp. 31–37.
8. **Filaretov V.V.** *Electrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1995, No. 4, pp. 36–43.
9. **Mandache L., Iordache M., Dumitriu L., Sirbu I., Niculae D.** Sensitivity analysis of analog circuits based on a modified nodal approach. *Proc. of Intern. Conf. on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, May 22–24, 2014, Moieciu, Romania, pp. 83–88.

[10.06.2019]