УДК 621.3.011.7

С.А. Курганов

ФОРМУЛЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДСХЕМ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Курганов Сергей Александрович, доктор технических наук, окончил Ульяновский политехнический институт по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры», профессор кафедры «Электроснабжение» Ульяновского государственного технического университета. Имеет статьи и монографии в области теоретических основ электротехники. [e-mail: sak@ulstu.ru].

Аннотация

На основе теоремы о косвенной компенсации подсхем и однократного эксперимента предложены формулы в виде отношения схемных определителей для диагностики элементов подсхем (каскадов) в составе электрических цепей. Формулы позволяют найти неизвестные параметры элементов, используя измерения на узлах и расчеты с параметрами только диагностируемой подсхемы, что сокращает объем вычислительных операций. Неизвестные параметры формируются в виде символьных дробно-рациональных выражений, содержащих известные параметры и измеренные напряжения и/или токи. Диагностируемая схема может содержать произвольные линейные элементы как двухполюсные, так и управляемые источники напряжения и тока всех типов, в том числе идеальные операционные усилители – нуллы. Для получения искомых параметров возможно использование известных алгоритмов и программ символьного или численного анализа электрических цепей. Приведен пример символьной диагностики элементов каскада в составе активного фильтра нижних частот.

Ключевые слова: электрические цепи, диагностика, подсхема, символьное выражение для параметра, схемный определитель, нуллы, схемно-алгебраическая формула.

doi:

FORMULAS FOR THE SUBCIRCUIT ELEMENT DIAGNOSTICS IN LINEAR ELECTRICAL CIRCUITS

Sergei Aleksandrovich Kurganov, Doctor of Sciences in Engineering; graduated from Ulyanovsk Polytechnic Institute with a degree in Design and Production of Radio Equipment; Professor of the Department of Electric Supply of UISTU; an author of articles and monographs in the field of theoretical foundations of electrical engineering. e-mail: sak@ulstu.ru.

Abstract

On the basis of the theorem on indirect compensation of subcircuits and a single experiment, formulas in the form of the ratio of circuit determinants for the diagnosis of subcircuits in electronic circuits are proposed. Formulas allow us to find unknown parameters of elements using measurements and calculations for the diagnosed subcircuit only, which reduces the amount of computational operations. Unknown parameters are obtained in the form of symbolic fractional-rational expressions containing known parameters and measured voltages and currents. The diagnostic circuit can contain arbitrary linear elements both bipolar and controlled voltage and current sources of all types, including ideal operational amplifiers-nullors. To obtain the desired parameters, it is possible to use known algorithms and programs of symbolic or numerical analysis of electrical circuits. An example of symbolic diagnostics of low-pass filter subcircuit elements is given.

Key words: electric circuits, diagnostics, subcircuit, formulas for parameters, circuit determinants, nullors, circuit-algebraic formula.

ВВЕДЕНИЕ

В элементном базисе проводимостей задача нахождения всех параметров подсхемы решается блочно-матричным методом на основе многократного экс-

перимента, который состоит в измерении напряжений и (или) токов на доступных узлах при изменении структуры цепи – подключении и отключении элементов цепи [1]. Число экспериментов должно быть не менее $(n + 1)$

для диагностики автономной подсистемы с n независимыми полюсами или сторонами. По результатам эксперимента формируется линейная система уравнений, из которой находится матрица узловых проводимостей и, следовательно, проводимости элементов.

В произвольном элементном базисе задача нахождения всех параметров подсистемы выполняется с помощью схемно-алгебраической формулы (САФ) для искомых параметров, полученной на основе теоремы о компенсации подсистемы и многократного эксперимента [2]. САФ содержит матрицы схемных определителей числителей (разностей числителей) откликов и воздействий, которые находятся методом схемных определителей по схеме с компенсированной подсистемой.

Задача определения части параметров схемы (подсистемы) при известных остальных параметрах формулируется как базисная задача диагностики [3]. Для решения этой задачи выполняется однократный эксперимент с числом независимых измерений, не меньшим числа неизвестных параметров. По результатам эксперимента формируется и решается численная матричная система уравнений относительно токов и напряжений элементов с неизвестными параметрами. Эта же задача решается на основе нулловых моделей с помощью универсальных численных программ анализа электрических цепей [4]. При этом используются параметры элементов не только диагностируемой подсистемы, но и всей цепи, что увеличивает объем вычислительных операций.

В символьном виде задача определения части параметров схемы (подсистемы) решается методом схемных определителей на основе теоремы о косвенной компенсации элементов [5]. При этом искомые параметры находятся с помощью САФ, в виде отношения определителей схемы с компенсированными элементами. САФ, как и матрицы в методе диагностики [3], содержат определители всей цепи.

Задача определения части параметров подсистемы при известных остальных параметрах может быть решена также на основе упомянутого многократного эксперимента – блочно-матричным методом [1] или методом компенсации подсистемы [2]. В то же время применение этих методов при наличии известных элементов в исследуемой подсистеме является избыточным, поскольку приходится выполнять расчет всей цепи.

При недостаточном числе доступных полюсов задача диагностики сводится к построению нелинейных уравнений при многократном эксперименте с источниками различных частот. Выбор частот существенно влияет на обусловленность формируемых систем уравнений и, следовательно, на достоверность полученного численного решения нелинейных уравнений [6].

Целью настоящей статьи является уменьшение вычислительных затрат при решении линейной задачи диагностики элементов подсистемы, содержащей часть известных параметров, на основе теоремы о компенсации подсистемы и однократного эксперимента.

1 САФ для ИСКОМЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ КОМПЕНСАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ [7]

Диагностируемая схема представлена на рисунке 1а. Прямоугольником обозначена неавтономная подсистема, которая может содержать произвольные линейные элементы. По теореме о косвенной компенсации элементов цепи сопротивление и источник тока, управляемый током (ИТУТ), с неизвестными параметрами (обозначены с индексом ?) заменяются норатором, а измеренные напряжение и ток устанавливаются фиксаторами напряжения и тока, которые представляют собой соответствующие источники с измеренным параметром, последовательно и параллельно которым подключены нулаторы (рис. 1б). Норатор и нулатор на компенсированной схеме обозначены двойной и одинарной заштрихованной стрелкой. Полученная схема называется схемой с компенсированными элементами (СКЭ).

САФ для искомых параметров получаются на основе компенсированной схемы на рисунке 1б в виде отношения двух схемных определителей. Так формула для искомого сопротивления имеет вид:

$$Z = -\Delta_Z / \Delta^Z. \quad (1)$$

В формуле (1) Δ_Z, Δ^Z – определители производных схем, полученных из СКЭ с многомерным управляемым источником, причем нижний (верхний) индекс означает, что схема получена путем замены норатора, соответствующего искомому сопротивлению Z , проводником (удаления соответствующего норатора). Многомерный источник представляет собой совокупность всех неза-

Рис. 1. Схемы для диагностики: с неизвестными параметрами (а); с компенсированными элементами (б); для определителя Δ^Z из формулы (1) при нахождении параметра Z_2 (в)

висимых источников напряжения и тока, преобразованных в источники, управляемые нулатором (с номером 2 на рисунке 1в), который оказывается непарным после удаления (замены проводником) норатора, соответствующего сопротивлению. Параметром управляемого источника является параметр соответствующего независимого источника.

Формула для нахождения проводимости аналогична формуле (1):

$$Y = -\Delta_Y / \Delta^Y, \quad (2)$$

где верхний и нижний индексы, как и в формуле (1), означают удаление и замену проводником соответствующего норатора в СКЭ.

Для параметра управляемых источников (УИ) – источника тока, управляемого напряжением (ИТУН); ИТУТ; источника напряжения, управляемого током (ИНУТ) и источника напряжения, управляемого напряжением (ИНУН) – формула может быть представлена в обобщенном виде:

$$\chi = -\frac{\Delta(\chi = 0)}{\Delta(\chi \rightarrow \text{нуллор})}, \quad (3)$$

где χ – обобщенный параметр УИ: коэффициент передачи тока β , коэффициент передачи напряжения k , передаточное сопротивление Z_y или передаточная проводимость Y_y ; $\Delta(\chi = 0)$ и $\Delta(\chi \rightarrow \text{нуллор})$ – определители СКЭ, в которой рассматриваемый УИ нейтраллизован (параметр равен нулю) или преобразован в нулор (норатор и нулатор) соответственно. Знаменатель (3) для всех УИ одинаков, поскольку преобразование УИ в нулор осуществляется независимо от типа УИ.

САФ для искоемых параметров независимых источников электродвижущей силы (ЭДС) и тока имеют вид:

$$\begin{aligned} \underline{E}_s &= \frac{\Delta_{\underline{E}_s}}{\Delta(\underline{E} = 0; \underline{J} = 0)}, \\ \underline{J}_s &= \frac{\Delta_{\underline{J}_s}}{\Delta(\underline{E} = 0; \underline{J} = 0)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\Delta_{\underline{E}_s}$ – определитель СКЭ, в которой норатор, соответствующий источнику ЭДС, заменен проводником; $\Delta_{\underline{J}_s}$ – определитель СКЭ, в которой норатор источника тока удален из схемы; $\Delta(\underline{E} = 0; \underline{J} = 0)$ – определитель СКЭ, в которой все независимые источники нейтрализованы.

2 ТЕОРЕМА О КОСВЕННОЙ КОМПЕНСАЦИИ ПОДСХЕМЫ [8]

Режим электрической цепи на рисунке 2а не изменится, если вместо подсхемы 1 подключить нораторы к каждой стороне подсхемы 2, смежной с подсхемой 1, а к сторонам с измеренным напряжением или током (показаны стрелками на рисунке 1а) – фиксаторы напряжения или тока (рис. 1б). Фиксаторы напряжения и тока содержат соответствующие источники с измеренным параметром, подключенные последовательно и параллельно нулатору.

3 САФ ДЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПОДСХЕМЫ НА ОСНОВЕ КОМПЕНСАЦИИ ПОДСХЕМЫ И ЭЛЕМЕНТОВ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Исходная схема представлена на рисунке 3а. Схема разделена на две подсхемы по n узлам. Подсхемы в

Рис. 2. Исходная (а) и эквивалентная (б) схемы: 1, 2, 3, ..., n и $n+1$, $n+2$, $n+3$, ..., $2n$ – номера сторон у подсхем 1 и 2; 1, 2, 3, ..., n – номера нулаторов и нораторов; $\underline{E}_{n+1} = \underline{U}_{n+1}$; $\underline{E}_{n+2} = \underline{U}_{n+2}$; $\underline{J}_{n+3} = \underline{I}_{n+3}$; ...; $\underline{J}_{2n} = \underline{I}_{2n}$ – параметры источников

Рис. 3. Схемы для диагностики подсхемы: исходная с диагностируемой подсхемой 1 (а); СКЭ после компенсации подсхемы 2 и элементов $Y_{1?}$, $Z_{2?}$, ..., $Y_{k?}$ (б)

общем случае автономные (содержат источники напряжения и тока), а в частном случае одна из них может быть неавтономной. Требуется определить неизвестные параметры k элементов в подсхеме 1 (обозначены знаком ?).

Среди элементов могут быть как двухполюсные проводимости и сопротивления, так и УИ. На рисунке 3а показан ИТУН с передаточной проводимостью Y_k . Искомые параметры обозначены $Y_1, Z_2, \dots, Y_k$. В подсхеме 1 имеется $(n+k)$ доступных сторон (полюсов), на которых измерены напряжения, если стороны разомкнуты, или токи, если стороны замкнуты. В подсхеме 2 могут быть элементы с известными и (или) неизвестными параметрами.

По теореме о компенсации вместо подсхемы 2 (рис. 3а) к сторонам $1, 2, \dots, n$ подсхемы 1 подключим нораторы с номерами $1, 2, \dots, n$, а к сторонам $(n+1), (n+2), \dots, 2n$, на которых измерены напряжение или ток – фиксаторы напряжения или тока. В составе подсхемы 1 компенсируем элементы с не-

известными параметрами $Y_{1?}, Z_{2?}, \dots, Y_{k?}$. Для этого указанные элементы заменим нулаторами с номерами $(n+1), (n+2), \dots, (n+k)$, а k измеренных токов установим соответствующими фиксаторами, нулаторы которых имеют номера $(n+1), (n+2), \dots, (n+k)$. В результате получим схему с компенсированной подсхемой 2 и компенсированными неизвестными элементами в составе подсхемы 1 (рис. 3б). Полученная СКЭ позволяет сформировать САФ для искомых параметров, используя однократный эксперимент с $(n+k)$ измерениями в исследуемой подсхеме 1.

САФ для сопротивления $Z_{1?}$ из схемы на рисунке 3а получается на основе (1) с использованием СКЭ на рисунке 3б. При этом схемный определитель Δ^Z формируется путем удаления норатора с номером $(n+1)$, а Δ_Z – путем замены этого норатора проводником. В обоих схемных определителях независимые источники преобразуются в источники, управляемые нуллатором с номером $(n+1)$. В результате САФ приобретает вид:

$$Z_1 = - \left[\begin{array}{c} \begin{array}{c} \text{Circuit diagram with two paths: top path has blocks } \underline{E}_{n+1}, \underline{E}_{n+2}, \dots, \underline{J}_{2n}, \underline{J}_{2n+1}, \underline{J}_{2n+2}, \dots, \underline{J}_{2n+k} \text{ in series; bottom path has blocks } 1, 2, \dots, n, n+2, \dots, n+k \text{ in series. A central block } 1 \text{ connects the two paths.} \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Circuit diagram with two paths: top path has blocks } \underline{E}_{n+1}, \underline{E}_{n+2}, \dots, \underline{J}_{2n}, \underline{J}_{2n+1}, \underline{J}_{2n+2}, \dots, \underline{J}_{2n+k} \text{ in series; bottom path has blocks } 1, 2, \dots, n, n+2, \dots, n+k \text{ in series. A central block } 1 \text{ connects the two paths.} \end{array} \end{array} \right], \quad (5)$$

где $||$ – определитель соответствующей схемы.

Для проводимости Y_{22} (рис. 3а) САФ получается в соответствии с (2) и имеет вид:

$$Y_2 = - \left[\begin{array}{c} \begin{array}{c} \text{Circuit diagram with components } \underline{E}_{n+1}, \underline{E}_{n+2}, \dots, \underline{J}_{2n}, \underline{J}_{2n+1}, \underline{J}_{2n+2}, \dots, \underline{J}_{2n+k} \text{ and a block } \mathbf{1} \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Circuit diagram with components } \underline{E}_{n+1}, \underline{E}_{n+2}, \dots, \underline{J}_{2n}, \underline{J}_{2n+1}, \underline{J}_{2n+2}, \dots, \underline{J}_{2n+k} \text{ and a block } \mathbf{1} \end{array} \end{array} \right], \quad (6)$$

где генераторы многомерного источника управляются нуллатором с номером $(n + 2)$.

Для параметра ИТУН Y_{k2} (рис. 3а) САФ находится по формуле (3) и имеет вид:

Числитель в (7) формируется из СКЭ на рисунке 3б путем удаления управляемой и управляющей ветвей ИТУН, а знаменатель – замены ИТУН нулором с номером $(n + k + 1)$. Управляющий нулатор в числителе и знаменателе имеет номер $(n + k)$. При определении параметров других управляемых источников в формуле (7) изменится только числитель: для ИТУТ – управляющая и управляемая ветвь заменяется проводником и

разрывом; для ИНУН – разрывом и проводником соответственно; для ИНУТ – обе ветви проводником.

Формулы для независимых источников формируются исходя из формул (4) и соответствующей СКЭ, которая получается так же, как и на рисунке 3б. Если в исходной схеме на рисунке 1а вместо сопротивления Z_1 поставить ЭДС с неизвестным параметром $\underline{E}_?$, то САФ будет иметь вид:

$$\underline{E} = - \left[\begin{array}{c} \begin{array}{c} \text{1} \quad \text{2} \quad \dots \quad n \quad n+1 \quad n+2 \quad \dots \quad n+k \\ \underline{E}_{n+1} \quad \underline{E}_{n+2} \quad \dots \quad J_{2n} \quad J_{2n+1} \quad J_{2n+2} \quad \dots \quad J_{2n+k} \end{array} \\ \text{1} \\ \begin{array}{c} \text{1} \quad \text{2} \quad \dots \quad n \quad n+1 \quad n+2 \quad \dots \quad n+k \\ \text{1} \quad \text{2} \quad \dots \quad n \quad n+1 \quad n+2 \quad \dots \quad n+k \end{array} \end{array} \right] \quad (8)$$

где в числителе норатор $(n+1)$ заменен на проводник, а в знаменателе параметры всех независимых источников равны нулю.

4 УСЛОВИЯ ДИАГНОСТИРУЕМОСТИ ПОДСХЕМ

Задача определения неизвестных параметров имеет решение, если определитель СКЭ (рис. 36) принимает ненулевое значение. Определитель СКЭ находится при нулевых значениях всех независимых источников, поэтому достаточное условие диагностируемости записывается в виде:

[illegible]

Необходимыми условиями существования решения является отсутствие в СКЭ вырожденных структур – контуров и сечений из нораторов или нуллаторов [7]. Эти условия обеспечиваются выбором узлов и сторон для измерения независимых $(n + k)$ напряжений и (или) токов.

5 ДИАГНОСТИКА ЭЛЕМЕНТОВ ПОДСХЕМЫ В СОСТАВЕ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ

Схема дана на рисунке 4 [9]. Операционные усилители (ОУ) $A_1, \dots, A_4$ идеальные и моделируются нуллорами с соответствующими номерами. Требуется найти емкость C_8 в подсхеме 2. Параметры остальных эле-

ментов подсхемы 2 известны. Узлы 10 и 13 доступны для измерения. Сведения о параметрах элементов подсхемы 1 отсутствуют.

Построение СКЭ. Действующее комплексное напряжение входного источника ЭДС обозначим $\underline{U}_{\text{вх}}$, измеренные напряжения на узлах 13 и 10 $\underline{U}_{13}$ и $\underline{U}_{10}$ соответственно. Построим СКЭ подсхемы в соответствии с рисунком 3б. Компенсируем подсхему 1 и проводимость Y_8 ($Y_8 = pC_8$, где p – комплексная частота) конденсатора C_8 путем подключения нораторов к полюсам 9–0 и 11–0. При этом установим $\underline{U}_{13}$ и $\underline{U}_{10}$ фиксаторами напряжения в соответствующих узлах. Заменим ОУ A_4 нуллом. Полученная СКЭ представлена на рисунке 5а.

Рис. 4. Активный фильтр нижних частот четвертого порядка: **1, 2** – номера подсхем

Рис. 5. СКЭ подсхемы 2 (а); схемы определителей числителя (б) и знаменателя (в) для формулы (6) применительно к искомой проводимости Y_8

Проверка условия диагностируемости. Запишем по формуле (9) схемно-алгебраическое выражение определителя СКЭ:

$$\Delta = \left| \begin{array}{ccc} R_{16} & R_{14} & Y_7 \\ 1 & 2 & 3 \\ 2 & 2 & 3 \end{array} \right| = -R_{14}(R_{15}+R_{17}). \quad (10)$$

Символьное выражение (10) получено с помощью следующих операций метода схемных определителей: замены проводником сопротивления R_{16} , последовательного норатора 1; взаимной замены номеров у нораторов с изменением знака определителя; замены проводником параллельного соединения норатора и нуллатора (с изменением знака определителя при их противоположных направлениях); выделения сопротивления R_{14} , параллельного норатору; удаления проводимости Y_7 , параллельной норатору (нуллатору) и последовательного соединения норатора и нуллатора; нахождения определителя контура из сопротивлений R_{15} и R_{17} . Как видно из выражения (10), задача диагностики имеет решение, если сопротивления R_{14} и R_{15} (или R_{17}) не равны нулю.

Получение символьного выражения для искомой проводимости Y_7 . Схемы для определителей числителя (рис. 5б) и знаменателя (рис. 5в) по формуле (6) получены из СКЭ (рис. 5а) путем замены норатора 2 разрывом и проводником соответственно. При этом независимые источники преобразованы в источники, управляемые нуллатором 2. После разложения определителей числителя и знаменателя методом схемных определителей, подобно определителю (10), получаем искомую проводимость в виде дробно-рациональной функции от измеренных напряжений и известных параметров:

$$Y_8 = \frac{U_{13}R_{15} - U_{10}(R_{15} + R_{17})}{(U_{13}R_{14}R_{15})}. \quad (11)$$

Для проверки полученного выражения Y_8 сформируем по методу схемных определителей символьные выражения для напряжений U_{10} и U_{13} в схеме фильтра на рисунке 4:

$$\begin{aligned} U_{10} &= R_{21}R_{23}(R_{11} + R_{13})R_{15}(Y_8R_{14} + 1)U_{\text{вх}}/D; \\ U_{13} &= R_{21}R_{23}(R_{11} + R_{13})(R_{15} + R_{17})U_{\text{вх}}/D; \\ D &= R_{18}R_{22}(Y_5R_{12}(R_{10}R_{11}Y_6 - R_{13}) + \\ &\quad + R_{11}(Y_6(R_{10} + R_{12}) + 1)) \times \\ &\quad \times (Y_7R_{16}(R_{14}R_{15}Y_8 - R_{17}) + \\ &\quad + R_{15}(Y_8(R_{14} + R_{16}) + 1)). \end{aligned} \quad (12)$$

Подставим напряжения U_{10} и U_{13} из (12) в формулу (11) для Y_8 . После эквивалентных алгебраических пре-

образований получим тождество $Y_8 = Y_8$. Это означает, что точность диагностики будет определяться только точностью измерений, поскольку численные итерационные методы в отличие от [1, 3, 4, 6] здесь не применяются. При этом символьное выражение (11) для проводимости Y_8 получено по результатам диагностики только подсхемы 2 – без использования подсхемы 1.

Процесс разложения схемных определителей в формулах (5)–(8) для искомых параметров может быть автоматизирован с помощью программы символьного анализа и диагностики CirSym, разработанной В.В. Филаретовым [10]. Online-сервис программы CirSym имеется на сайте <http://intersyn.net/cirsym.html>.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе косвенной компенсации как подсхемы, так и элементов с неизвестными параметрами предложены формулы в виде отношения схемных определителей для искомых параметров подсхемы, часть параметров которой известны. Подсхема, как и электрическая схема в целом, может содержать произвольные линейные элементы как двухполюсные, так и любые управляемые источники, в том числе нуллы.

2. Предлагаемые формулы содержат схемные определители только диагностируемой подсхемы, что позволяет сократить вычислительные затраты по сравнению с известными методами, которые используют матрицы или схемные определители электрической цепи в целом. При этом точность диагностики определяется только точностью измерений напряжений и токов, поскольку формулы предназначены для формирования символьных выражений для искомых параметров и не используют численных итерационных методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киншт Н.В., Петрунько Н.Н. Тестовая диагностика активных электрических цепей на основе коммутационных воздействий // Электричество. – 2014. – № 6. – С. 49–55.
2. Горшков К.С., Курганов С.А., Филаретов В.В. Диагностика линейных электрических цепей с косвенной компенсацией подсхем при многократном эксперименте // Электричество. – 2017. – № 12. – С. 36–42.
3. Киншт Н.В., Петрунько Н.Н. О двух концепциях в теории диагностики электрических цепей // Электричество. – 2012. – № 9. – С. 59–64.

4. Nullator-norator approach to analogue circuit diagnosis using general-purpose analysis programmes / S.L. Farchy, E.D. Gadzheva, L.H. Raykovska and T.G. Kouyoumdjiev // *International Journal of Circuit Theory and Applications*. 1995. Vol. 23, is. 6. pp. 571–585.

5. Курганов С.А. Символьный подход к решению задачи диагностики электрических цепей // *Электричество*. – 2002. – № 8. – С. 49–52.

6. A Method for the Automatic Selection of Test Frequencies in Analog Fault Diagnosis / F. Grasso, A. Luchetta, S. Manetti, M.C. Piccirilli // *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. 2007. Vol. 56, no. 6. pp. 2322–2329.

7. Filaretov V., Gorshkov K., Kurganov S. Generalized Parameter Extraction Method for Analog Circuit Fault Diagnosis // *Proc. of International Conference on Industrial Engineering ICIE–2016 (19–20 May)*. Chelyabinsk (Russia). IEEE Xplore. pp.1–6.

8. Горшков К.С., Курганов С.А., Филаретов В.В. Диагностика линейных электрических цепей на основе косвенной компенсации подсхем с неизвестными параметрами // *Синтез, анализ и диагностика электронных цепей : междунар. сб. науч. тр. – Ульяновск : УЛГТУ, 2016. – Вып. 13. – С. 93–108.*

9. Sensitivity analysis of analog circuits based on a modified nodal approach / L. Mandache, M. Iordache, L. Dumitriu, I. Sirbu, D. Niculae // *International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*. Moieciu, Romania, 2014, May 22–24. pp. 83–88.

10. Филаретов В.В. Программа символьного анализа CIRSYM: история создания, структура и функции // *Синтез, анализ и диагностика электронных цепей : междунар. сб. науч. труд. – Ульяновск : УЛГТУ, 2012. – Вып. 10. – С. 158–171.*

REFERENCES

1. Kinsht N.V., Petrunko N.N. Testovaia diagnostika aktivnykh elektricheskikh tsepei na osnove kommutatsionnykh vozdествii [Test Diagnostics of Active Electric Circuits Based on Switching Actions]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2014, no. 6, pp. 49–55.

2. Gorshkov K.S., Kurganov S.A., Filaretov V.V. Diagnostika lineinykh elektricheskikh tsepei s kosvennoi kompensatsiei podskhem pri mnogokratnom eksperimente [Diagnostics of Linear Electric Circuits with Indirect Compensation of Subcircuits in Multiple Experiments]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2017, no. 12, pp. 36–42.

3. Kinsht N.V., Petrunko N.N. O dvukh kontseptsiiakh v teorii diagnostiki elektricheskikh tsepei [On Two Concepts in the Theory of Diagnostics of Electric Circuits]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2012, no. 9, pp. 59–64.

4. Farchy S.L., Gadzheva E.D., Raykovska L.H., and Kouyoumdjiev T.G. Nullator-norator Approach to Analogue Circuit Diagnosis Using General-Purpose Analysis Programmes. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 1995, vol. 23, iss. 6, pp. 571–585.

5. Kurganov S.A. Simvolnyi podkhod k resheniiu diagnostiki elektricheskikh tsepei [Symbolic Approach to Solving the Problem of Diagnostics of Electric Circuits]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2002, no. 8, pp. 49–52.

6. Grasso F., Luchetta A., Manetti S., Piccirilli M.C. A Method for the Automatic Selection of Test Frequencies in Analog Fault Diagnosis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, vol. 56, no. 6, pp. 2322–2329.

7. Filaretov V., Gorshkov K., Kurganov S. Generalized Parameter Extraction Method for Analog Circuit Fault Diagnosis. *Proc. of International Conference on Industrial Engineering ICIE–2016 (19–20 May)*. Chelyabinsk (Russia). IEEE Xplore, pp. 1–6.

8. Gorshkov K.S., Kurganov S.A., Filaretov V.V. Diagnostika lineinykh elektricheskikh tsepei na osnove kosvennoi kompensatsii podskhem s neizvestnymi parametrami [Diagnostics of Linear Electric Circuits Based on Indirect Compensation of Subcircuits with Unknown Parameters]. *Sintez, analiz i diagnostika elektronnykh tsepei. Mezhdunar. sb. nauch. tr.* [Int. Proc. on Synthesis, Analysis and Diagnostics of Electronic Circuits]. Ulyanovsk, ULSTU Publ., 2016, iss. 13, pp. 93–108.

9. Mandache L., Iordache M., Dumitriu L., Sirbu I., Niculae D. Sensitivity Analysis of Analog Circuits Based on a Modified Nodal Approach. *Int. Conf. on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, May 22–24. Moieciu, Romania, 2014, pp. 83–88.

10. Filaretov V.V. Programma simvolnogo analiza CIRSYM: istoriia sozdaniia, struktura i funktsii [CIRSYM Symbolic Analysis Program: Creation History, Structure and Functions]. *Sintez, analiz i diagnostika elektronnykh tsepei. Mezhdunar. sb. nauch. tr.* [Int. Proc. on Synthesis, Analysis and Diagnostics of Electronic Circuits]. Ulyanovsk, ULSTU Publ., 2012, iss. 10, pp. 158–171.