

Информационные, управляющие и измерительные системы Information, Control and Measurement Systems

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15305>

УДК 621.3.011.7



ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С.А. Курганов¹ ✉, П.В. Недорезов², В.В. Филаретов³

^{1,3} Ульяновский государственный технический университет,
г. Ульяновск, Российская Федерация;

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ sakurganov@mail.ru

Аннотация. Для решения задачи параметрической диагностики предложено использовать компенсацию нелинейных элементов как с неизвестными, так и с известными параметрами. Этим диагностика нелинейной цепи сводится к базисной задаче диагностики линейной схемы замещения при многократном эксперименте. Кратность эксперимента и расчета схемы замещения определяется числом требуемых точек вольтамперных характеристик (ВАХ) нелинейных резисторов и передаточных характеристик нелинейных управляемых источников. Число измерений при каждом эксперименте должно быть не менее числа нелинейных элементов и линейных элементов с неизвестными параметрами. Вычислительные затраты можно сократить, если использовать символьные методы анализа, позволяющие получить ВАХ и передаточные характеристики нелинейных элементов в виде параметрических функций. Предлагаемый подход позволяет автоматизировать диагностику нелинейных элементов в статическом режиме с помощью известных символьных и численных программ анализа линейных электрических цепей. Приведен пример нахождения ВАХ нелинейных резисторов с помощью разработанной программы символьного анализа CirSym.

Ключевые слова: электрическая цепь, статический режим, базисная задача диагностики, нелинейный резистор, нелинейный управляемый источник, косвенная компенсация, вольтамперная характеристика

Для цитирования: Курганов С.А., Недорезов П.В., Филаретов В.В. Параметрическая диагностика электрических цепей в статическом режиме методом компенсации нелинейных элементов // Computing, Telecommunications and Control. 2022. Т. 15, № 3. С. 62–72. DOI: 10.18721/JCSTCS.15305

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15305>

UDC 621.3.011.7



PARAMETRIC DIAGNOSTICS OF ELECTRICAL CIRCUITS IN STATIC MODE BY THE METHOD OF COMPENSATION OF NONLINEAR ELEMENTS

S.A. Kurganov¹ ✉, P.V. Nedorezov², V.V. Filaretov³

^{1,3} Ulyanovsk State Technical University,
Ulyanovsk, Russian Federation;

² Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI",
St. Petersburg, Russian Federation

✉ sakurganov@mail.ru

Abstract. To solve the diagnostic problem in static mode, it is proposed to use compensation of nonlinear elements with both unknown and known parameters. This reduces the diagnosis of a nonlinear circuit to the basic task of diagnosing a linear substitution circuit with multiple experiments. The multiplicity of the experiment and the calculation of the substitution circuit is determined by the number of required points of the volt-ampere characteristics of nonlinear resistors and the transfer characteristics of nonlinear controlled sources. The number of measurements in each experiment should not be less than the number of nonlinear elements and linear elements with unknown parameters. Computational costs can be reduced if symbolic analysis methods are used to obtain volt-ampere and transfer characteristics of nonlinear elements in the form of parametric functions. The proposed approach makes it possible to automate the diagnostics of nonlinear elements in a static mode using well-known symbolic and numerical programs for the analysis of linear electrical circuits. An example of finding the volt-ampere characteristics of nonlinear resistors using the developed CirSym symbolic analysis program is given.

Keywords: electric circuit, static mode, basic diagnostic problem, nonlinear resistor, nonlinear controlled source, indirect compensation, volt-ampere characteristic

Citation: Kurganov S.A., Nedorezov P.V., Filaretov V.V. Parametric diagnostics of electrical circuits in static mode by the method of compensation of nonlinear elements. *Computing, Telecommunications and Control*, 2022, Vol. 15, No. 3, Pp. 62–72. DOI: 10.18721/JCSTCS.15305

Введение

Параметрическая диагностика нелинейных электрических цепей в статическом режиме требует нахождения по результатам эксперимента вольтамперных характеристик (ВАХ) нелинейных резисторов и передаточных характеристик нелинейных управляемых источников (УИ) или неизвестных параметров линейных резисторов и УИ [1–6].

В процессе многовариантного обращения к программе анализа нелинейных электрических цепей SAPDEC подбирается параметр линейного элемента, чтобы расчетные и измеренные отклики компьютерной модели и реальной цепи соответствовали друг другу с заданной точностью [1]. В [2] рассмотрено нахождение сопротивлений нескольких линейных резисторов в нелинейной цепи. Для этого проводится многократный эксперимент с подключением источников постоянного напряжения к доступным узлам, измеренные на них напряжения учитываются в системе нелинейных алгебраических уравнений для искомых сопротивлений. Параметры нескольких линейных элементов находятся также методом, основанным на обобщенной частотной функции нелинейных цепей и алгоритме наименьших квадратов [3].

В работах [1–3] характеристики нелинейных элементов не являются искомыми. В [4] находятся дифференциальные характеристики нелинейных элементов иерархическим методом. Задача нахождения ВАХ нелинейных резисторов и передаточных характеристик нелинейных УИ

сводится к многократному решению *базисной задачи* диагностики линейной электрической цепи, считая все нелинейные элементы неизвестными [5]. Система уравнений, формируемая относительно токов и/или напряжений нелинейных резисторов и нелинейных УИ, оказывается линейной и решается по результатам каждого эксперимента при различных значениях функций независимых источников. Число экспериментов определяется требуемыми точками ВАХ нелинейного резистора. В [6] приведено решение задачи диагностики электрической цепи в статическом режиме для одного нелинейного резистора. Источник постоянного напряжения принимает ряд значений, его ток измеряется и учитывается в системе уравнений для тока и статического сопротивления нелинейного резистора.

Недостатком методов [5, 6] является трудоёмкое неформализованное построение уравнений диагностируемой цепи. В то же время *метод косвенной компенсации* позволяет применить для диагностики линейных цепей известные автоматизированные программы численного [7, 8] и символьного [9] анализа электронных цепей. В [7] для компенсации неисправности в линейной электрической цепи параллельно неисправному элементу подключается норатор. Измеренные на доступных узлах напряжения устанавливаются с помощью фиксатора напряжения, который представляется последовательным соединением нуллатора и источника электродвижущей силы (ЭДС) с измеренным напряжением. После замены пары норатор–нуллатор на источник напряжения, управляемый напряжением, с предельно большим параметром (для имитации нуллора), компенсированная схема анализируется программой численного моделирования PSpice для получения токов и напряжений неисправных элементов [7]. Аналогичным образом метод косвенной компенсации применяется для диагностики многополюсной линейной электрической цепи в системе численного моделирования OrCad Capture [8].

Цель настоящей работы – *обобщение метода косвенной компенсации для параметрической диагностики нелинейных цепей в статическом режиме* при нахождении характеристик нелинейных элементов и параметров линейных элементов компьютерными программами анализа линейных электрических цепей.

Символьная диагностика линейных электрических цепей методом косвенной компенсации [9, 10]. Диагностируемая цепь содержит линейный резистор с неизвестным сопротивлением r (рис. 1 а). Прямоугольником обозначена произвольная подсхема, содержащая линейные резисторы, УИ с известными параметрами и нуллоры – идеальные операционные усилители. Вольтметром V указана сторона многополюсника с измеренным напряжением.

Резистор r компенсируется путем замены его норатором (обозначен двойной заштрихованной стрелкой), как показано на рис. 1 б. При этом измеренное напряжение u_v устанавливается фиксатором, содержащим источник ЭДС и нуллатор (обозначен одинарной заштрихованной стрелкой).

Топологическим условием диагностируемости является отсутствие в компенсированной схеме контуров и сечений из нораторов или нуллаторов. Достаточным условием диагностируемости является отличие от нуля схемного определителя компенсированной схемы (рис. 1 в) [9]:

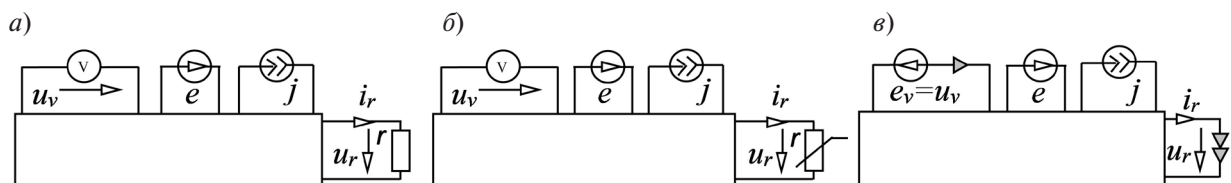


Рис. 1. Исходная схема с линейным (а) и нелинейным (б) резистором, и схема с компенсированным линейным или нелинейным резистором (в)

Fig. 1. The initial circuit with a linear (a) and nonlinear (b) resistor, and a circuit with a compensated linear or nonlinear resistor (c)

$$\Delta = \left| \begin{array}{c} \text{[Circuit diagram: a rectangular box with a resistor on top and a voltage source on the right]} \\ \hline \end{array} \right|, \quad (1)$$

где схема получена из компенсированной схемы (рис. 1 а) приравниванием к нулю параметров независимых источников напряжения и тока; $|\cdot|$ – символ определителя соответствующей схемы.

Определитель схемы или схемный определитель – это символьное выражение, тождественное матричному определителю, полученное без построения уравнений путем выделения параметров элементов непосредственно из схемы. Схемный определитель в отличие от матричного определителя не содержит избыточных слагаемых, равных по модулю, но противоположных по знаку [11].

Искомое сопротивление резистора находится по схемно-алгебраической формуле (САФ), содержащей как схемные образы, так и алгебраические операции [10]:

$$r = u_r / i_r = - \left| \begin{array}{c} \text{[Circuit diagram: box with sources } e_v=U_v, e, j \text{ and a resistor on top]} \\ \hline \end{array} \right| / \left| \begin{array}{c} \text{[Circuit diagram: box with sources } e_v=U_v, e, j \text{ and a gap on top]} \\ \hline \end{array} \right|. \quad (2)$$

В (2) числитель и знаменатель получаются из исходной схемы (рис. 1 а) заменой резистора проводником и разрывом соответственно, а независимые источники замещаются многомерным источником, управляемым нуллатором. Формулы выделения многомерного УИ позволяют получить в отличие от формул для независимых источников компактные символьные выражения [10].

Компенсация линейных УИ выполняется аналогично двухполюсникам. Так, источник тока, управляемый током, (ИТУТ) (рис. 2 а) с неизвестным параметром β компенсируется заменой генератора ИТУТ норатором и установлением измеренного напряжения u_v фиксатором напряжения (рис. 2 в).

Диагностируемость схемы с ИТУТ проверяется, как и схемы с резистором (рис. 1 а), по ненулевому значению определителя компенсированной схемы (рис. 2 в). САФ для нахождения параметра ИТУТ имеет вид [10]:

$$\beta = i/j = \left| \begin{array}{c} \text{[Circuit diagram: box with sources } e_v=U_v, 1, e, j \text{ and a resistor on top]} \\ \hline \end{array} \right| / \left| \begin{array}{c} \text{[Circuit diagram: box with sources } e_v=U_v, 1, e, j \text{ and a gap on top]} \\ \hline \end{array} \right|, \quad (3)$$

где схемы числителя и знаменателя получены из исходной схемы (рис. 2 а) заменой ИТУТ нуллатором (управляющая и управляемая ветви заменяются нуллатором и норатором соответственно) и его нейтрализацией ($\beta = 0$), все независимые источники, как и в формуле (2), заменяются многомерным источником, управляемым нуллатором.

Символьные выражения для искомого сопротивления и коэффициента передачи тока получаются из (2) и (3) путем разложения определителей по методу схемных определителей (МСО) [11]. Автоматизированное разложение может быть выполнено по программе символьного анализа и диагностики линейных электрических цепей CirSym, разработанной В.В. Филаретовым [12]. Онлайн-сервис программы имеется на сайте <http://intersyn.net/cirsym.html>.

Обобщение формул вида (2) и (3) для диагностики нелинейных электрических цепей в статическом режиме. Косвенная компенсация применима не только для линейных, но и для нелинейных элементов. Компенсация нелинейного резистора (рис. 1 б) и нелинейного УИ, например, ИТУТ

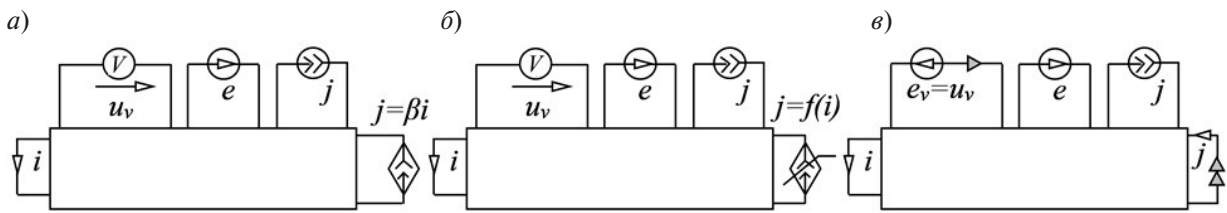


Рис. 2. Исходная схема с линейным (а) и нелинейным (б) ИТУТ, и схема с компенсированным линейным или нелинейным ИТУТ (в)
 Fig. 2. The initial scheme with linear (a) and nonlinear (b) CCCS and the scheme with compensated linear or nonlinear CCCS (c)

(рис. 2 б) выполняется как и для соответствующих линейных элементов, а схемы с компенсированными нелинейными элементами совпадают со схемами с компенсированными линейными элементами (рис. 1 в и 2 в). Компенсация других типов УИ – источника тока, управляемого напряжением, источника напряжения, управляемого током, и источника напряжения, управляемого напряжением, – выполняется аналогично ИТУТ. Управляемая ветвь – генератор напряжения и тока – так же, как и на рис. 2 в, заменяется норатором.

При компенсации всех нелинейных элементов электрическая цепь становится линейной, *линейные сопротивления и УИ* могут быть определены по формулам (2) и (3), которые при разложении определителей получаются в виде

$$r = N_r(R, G, P, e, j, e_v) / D_r(R, G, P, e, j, e_v); \quad (4)$$

$$\beta = N_\beta(R, G, P, e, j, e_v) / D_\beta(R, G, P, e, j, e_v), \quad (5)$$

где $N_r, D_r, N_\beta, D_\beta$ – рациональные выражения числителей и знаменателей искомого сопротивления r и параметра ИТУТ β как функций известных линейных сопротивлений R , проводимостей G , параметров УИ P , независимых источников ЭДС e , тока j и компенсирующих источников e_v .

По формулам (4) и (5) можно определить *статические сопротивления нелинейных резисторов и статические коэффициенты передачи нелинейных УИ*. Для этого эксперимент, компенсация и расчет по формулам (4) и (5) проводятся многократно с разными напряжениями и токами независимых источников.

САФ для ВАХ нелинейных резисторов и передаточных характеристик нелинейных ИТУТ следуют из формул (2) и (3):

$$u_r = \Delta(r = 0) / \Delta_r; \quad i_r = -\Delta(r = \infty) / \Delta_r; \quad (6)$$

$$i_\beta = \Delta(\beta = 0) / \Delta_\beta; \quad j_\beta = -\Delta(\beta \rightarrow \text{нуллор}) / \Delta_\beta. \quad (7)$$

В формулах (6) и (7): Δ_r, Δ_β – определители компенсированных схем на рис. 1 в и 2 в; $\Delta(r = 0)$ и $\Delta(r = \infty)$ – определители модифицированных схем, полученных из схемы (рис. 1 б) заменой резистора r проводником и разрывом соответственно; $\Delta(\beta = 0)$ и $\Delta(\beta \rightarrow \text{нуллор})$ – определители схем, полученных из схемы (рис. 2 б) путем нейтрализации ИТУТ ($\beta = 0$) и замены ИТУТ на нулмор. При этом во всех схемах из определителей $\Delta(r = 0)$, $\Delta(\beta = 0)$, $\Delta(\beta = 0)$ и $\Delta(\beta \rightarrow \text{нуллор})$ все независимые источники заменены на многомерный источник, управляемый нулмором.

При разложении САФ (6)–(7) по МСО ВАХ резистора и передаточная характеристика ИТУТ получаются в параметрическом виде:

$$\begin{aligned} u_r &= N_r(R, P, e, j, e_v) / \Delta_r(R, P, e, j, e_v); \\ i_r &= D_r(R, P, e, j, e_v) / \Delta_r(R, P, e, j, e_v); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} i_\beta &= N_\beta(R, P, e, j, e_v) / \Delta_\beta(R, P, e, j, e_v); \\ j_\beta &= D_\beta(R, P, e, j, e_v) / \Delta_\beta(R, P, e, j, e_v), \end{aligned} \quad (9)$$

где $N_r(R, G, e, j, e_v)$, $D_r(R, G, e, j, e_v)$ и $N_\beta(R, G, e, j, e_v)$, $D_\beta(R, G, e, j, e_v)$ – рациональные выражения из формул (4) и (5); $\Delta_r(R, P, e, j, e_v)$, $\Delta_\beta(R, P, e, j, e_v)$ – рациональные выражения определителей компенсированной схемы с резистором (рис. 1 в) и с ИТУТ (рис. 2 в).

Для получения ВАХ нелинейного резистора или передаточной характеристики нелинейного УИ в виде таблицы численных значений или графика проводится многократный эксперимент – измеряются напряжения и/или токи на доступных узлах при множестве значений функции независимого источника – и выполняется многократный расчет по формулам вида (8) или (9).

Численные функции нелинейных элементов можно получить и с помощью численных программ анализа линейных электрических цепей. Для этого требуется многократно рассчитать режим компенсированной схемы (рис. 1 в или рис. 2 в), в которой пара норатор–нуллатор заменяется линейным источником напряжения или тока, управляемым напряжением или током, с предельно большим параметром.

Алгоритм символьной параметрической диагностики нелинейных цепей в статическом режиме методом косвенной компенсации.

1. Из исходной электрической цепи получить статическую схему замещения, содержащую η и χ нелинейных резисторов и УИ соответственно, σ и μ линейных резисторов и УИ с неизвестными параметрами. При этом число p доступных для измерения напряжений и токов узлов и ветвей должно быть не меньше числа $s = \eta + \chi + \sigma + \mu$ – суммы чисел нелинейных элементов и линейных элементов с неизвестными параметрами.

2. Построить компенсированную схему (рис. 1 в или рис. 2 в), все параметры задать в виде символов. Проверить по CirSym схему на диагностируемость – определитель схемы должен отличаться от нуля.

3. Получить по CirSym ВАХ нелинейного резистора и/или передаточную характеристику УИ, например, ИТУТ в параметрической форме – в виде символьных функций напряжения u_r и тока i_r (8) и/или управляющего i_β и управляемого j_β тока (9).

4. Провести многократный эксперимент по схеме на рис. 1 а или 2 а, устанавливая n раз различные значения источников постоянного напряжения e_k и тока j_k , и измеряя в установившемся режиме p напряжений и токов.

5. Построить по точкам ВАХ $i_r = i_r(u_r)$ нелинейного резистора и/или передаточную характеристику УИ, например, ИТУТ $j_\beta = j_\beta(i_\beta)$ в табличной или графической форме путем n -кратной подстановки в параметрические функции нелинейных элементов (8)–(9) значений p напряжений и токов.

Пример нахождения ВАХ p – n переходов биполярного транзистора в схеме усилителя постоянного тока. Здесь иллюстрируется получение ВАХ p – n -переходов, недоступных для прямого измерения. Характеристики находятся косвенным путем – на основе напряжений, измеренных в доступных узлах схемы. В качестве измеренных напряжений используются соответствующие результаты математического моделирования. Приведенные далее пункты 1–5 соответствуют пунктам предложенного выше алгоритма.

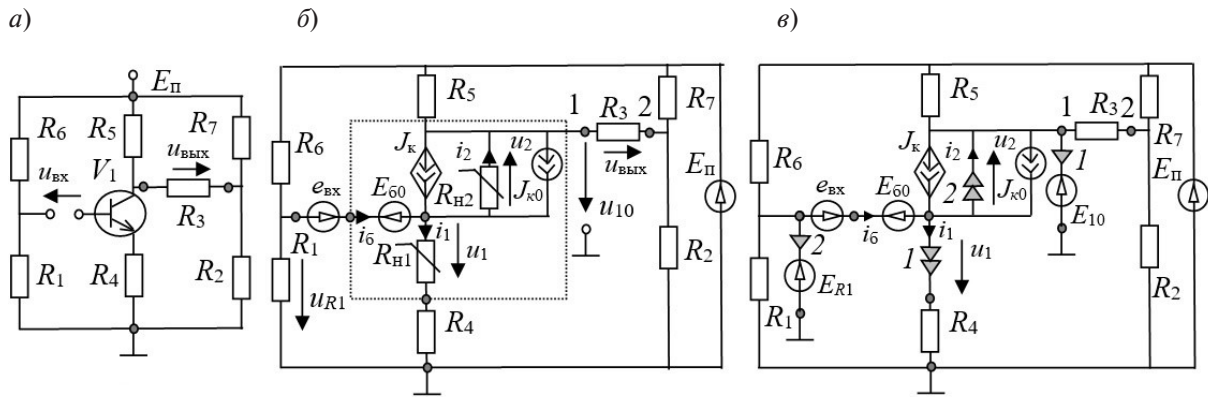


Рис. 3. Каскад усилителя постоянного тока: исходная схема (а); схема замещения (б); схема с компенсированными нелинейными резисторами $R_{н1}$ и $R_{н2}$ (в)

Fig. 3. DC amplifier stage: initial circuit (a); replacement circuit (b); circuit with compensated nonlinear resistors $R_{н1}$ and $R_{н2}$ (c)

1. Получаем по исходной схеме транзисторного каскада (рис. 3 а) [13] схему замещения (рис. 3 б), в которой использована кусочно-нелинейная схема замещения биполярного транзистора [14]. Известны сопротивления резисторов (в килоомах): $R_1 = 1,2$; $R_2 = 5,5$; $R_3 = R_5 = 10$; $R_4 = 0,5$; $R_6 = 20$; $R_7 = 5$; параметры элементов схемы замещения транзистора – напряжение смещения базы $E_{60} = 0,2$ В; ток смещения коллекторного перехода $J_{к0} = 1$ мА; коэффициент передачи тока базы $\beta = 50$; напряжение питания $E_{п} = 15$ В. Требуется найти ВАХ эмиттерного $R_{н1}$ и коллекторного $R_{н2}$ $p-n$ переходов. Для измерения доступны входные и выходные узлы. Двух напряжений u_{R1} и u_{10} (рис. 3 б) в соответствии с п. 1 достаточно для нахождения ВАХ двух нелинейных резисторов $R_{н1}$ и $R_{н2}$.

2. Нелинейные резисторы $R_{н1}$ и $R_{н2}$ (рис. 3 б) компенсируются в соответствии с рис. 1 в заменой их нораторами, измеренные напряжения u_{R1} и u_{10} устанавливаются фиксаторами из нуллаторов и источников ЭДС $E_{R1} = u_{R1}$ и $E_1 = u_{10}$ (рис. 3 в). Определитель компенсированной схемы отличен от нуля:

$$D = -R_6 * R_1 * R_5 * (R_2 * (R_3 + R_7) + R_3 * R_7) = -31,8 \cdot 10^{18} \text{ Ом}^5, \quad (10)$$

где обозначения резисторов записаны в формате программы CirSym.

3. Получим по компенсированной схеме (рис. 3 в) также с помощью CirSym ВАХ нелинейных резисторов $R_{н1}$ и $R_{н2}$ в параметрическом виде – в виде формул для токов и напряжений в зависимости от известных сопротивлений, входного напряжения, напряжения питания и измеренных напряжений:

$$\begin{aligned} I_1 = & [-R_6 * R_1 * R_5 * J_{к0} * (R_2 * (R_3 + R_7) + R_3 * R_7) - \\ & - R_6 * R_1 * E_{10} * ((R_3 + R_5) * (R_2 + R_7) + \dots R_2 * R_7) + \\ & + R_1 * (E_{п} * R_2 * R_5 * R_6 - (-R_2 * E_{п} * (R_3 + R_7) - R_7 * R_3 * E_{п})) * (-\beta * R_5 + R_6) + \\ & + \dots R_5 * E_{R1} * (R_2 * (R_3 + R_7) + R_3 * R_7) * \beta_1 * (R_6 + R_1) / D; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_2 &= [R_6 * R_1 * E_{10} ((R_3 + R_5) * (R_2 + R_7) + R_2 * R_7) - \\
&- (R_1 * E_{\Pi} - E_{R1} * (R_6 + \dots + R_1)) * R_5 * (R_2 * (R_3 + R_7) + R_3 * R_7) - \\
&- R_1 * R_6 * E_{\Pi} * (R_3 * (R_2 + R_7) + \dots + R_2 * (R_5 + R_7))] / D; \\
U_1 &= [R_5 * R_6 * R_1 * E_{\delta o} * (R_2 * (R_3 + R_7) + R_3 * R_7) - \\
&- R_5 * R_6 * R_1 * E_{\delta x} * (R_2 * (R_3 + R_7) \dots + R_3 * R_7) + \\
&+ R_1 * (R_6 * R_5 * E_{10} * (R_2 * (R_3 + R_7) + R_3 * R_7) - \\
&- \dots - R_6 * R_5 * E_{R1} * (R_2 * (R_3 + R_7) + R_3 * R_7))] / D; \\
U_2 &= [R_5 * R_6 * R_1 * E_{\delta o} * (R_2 * (R_3 + R_7) + R_3 * R_7) - \\
&- R_5 * R_6 * R_1 * E_{\delta x} * (R_2 * (R_3 + R_7) + \dots + R_3 * R_7) - \\
&- R_6 * R_1 * E_{10} * R_4 * ((R_3 + R_5) * (R_2 + R_7) + R_2 * R_7) - \\
&- (-R_1 * E_{\Pi} * R_4 + \dots + E_{R1} * (R_4 * (R_6 + R_1) + R_6 * R_1)) * \\
&* R_5 * (R_2 * (R_3 + R_7) + R_3 * R_7) - \dots - R_1 * R_6 * R_4 * E_{R1} * R_5 * R_3 + \\
&+ R_1 * R_6 * R_4 * (-E_{\Pi} + E_{R1}) * R_3 * R_5 + \dots + \\
&+ R_6 * R_1 * R_4 * E_{R1} * ((R_5 + R_7) * (R_2 + R_3) + R_2 * R_3) - \\
&- R_6 * R_1 * (-E_{\Pi} * R_4 + \dots + R_4 * E_{R1}) * ((R_5 + R_7) * (R_2 + R_3) + R_2 * R_3) / D,
\end{aligned} \tag{11}$$

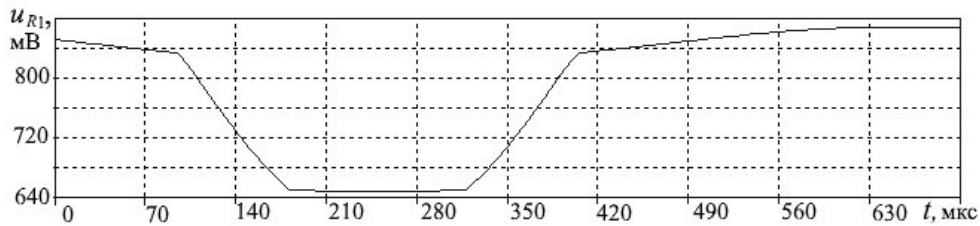
где обозначение параметров и переменных соответствует компенсированной схеме на рис. 3 в; D – определитель этой схемы из формулы (10).

4. Пусть ВАХ резисторов $R_{н1}$ и $R_{н2}$ одинаковые: $i = 0,008 u_2$ при $u \geq 0$ (ток и напряжение в амперах и вольтах) и $i = 0$ при $u < 0$. На входе схемы действует синусоидальная ЭДС частотой $f = 1$ кГц и амплитудой $E_{вх.м} = 1$ В, большей, чем в рабочем режиме, чтобы получить ВАХ в более широком диапазоне напряжений. Графики напряжений u_{R1} и u_{10} , полученные по схеме (рис. 3 б) на интервале 700 мкс с помощью программы LTSpice [15], представлены на рис. 4 а, б.

5. Рассчитаем по формулам (11) графики ВАХ (рис. 5 а, б) нелинейных резисторов $R_{н1}$ и $R_{н2}$. Как видно, графики соответствуют исходным квадратичным функциям. При этом погрешность ВАХ определяется погрешностью анализа нелинейной схемы (рис. 3 б). Так, при расчете напряжений u_{R1} и u_{10} по программе LTSpice [15] с тремя верными знаками (из семи) численные значения ВАХ получаются с таким же числом точных знаков.

Расчет численных ВАХ может быть выполнен и с помощью численных программ анализа электрических цепей, например, LTSpice по компенсированной схеме (рис. 3 в). При замещении нуллора УИ с большим коэффициентом передачи вносится численная погрешность, которая отсутствует при использовании символьного метода. Символьные функции нелинейных характеристик позволяют уменьшить время расчета при большом числе вариантов, поскольку не требуют повторного анализа схемы.

а)



б)

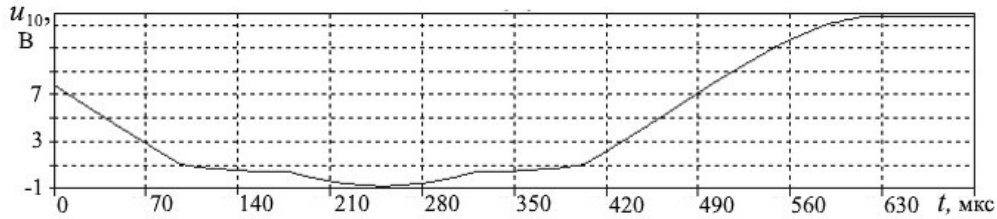
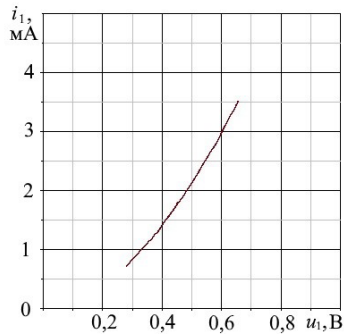


Рис. 4. Напряжения u_{R1} (а) и u_{10} (б) как функции времени
 Fig. 4. The voltages u_{R1} (a) and u_{10} (b) as a function of time

а)



б)

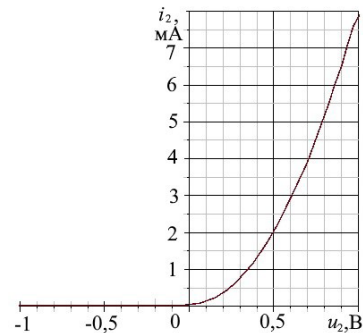


Рис. 5. ВАХ нелинейных резисторов R_{n1} (а) и R_{n2} (б) по результатам диагностики
 Fig. 5. VAC of nonlinear resistors R_{n1} (a) and R_{n2} (b) according to diagnostic results

Выводы

Задача диагностики нелинейных электрических цепей в статическом режиме сведена с помощью метода косвенной компенсации к базисной задаче диагностики линейных электрических цепей, что позволяет получать решение с помощью известных программ символьного или численного анализа линейных электрических цепей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liberatore A., Manetti S., Piccirilli M.C. Network symbolic analysis automated fault diagnosis // Proc. 1992 IEEE Internat. Symp. on Circuits and Systems. Computer Science. 1992. Pp. 1169–1172.
2. Tadeusiewicz M., Halgas S. A method for fault diagnosis of nonlinear circuits // COMPEL: The Internat. J. for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. 2019. Vol. 38, no. 6. Pp. 1770–1781. DOI: 10.1108/COMPEL-03-2019-0101

3. **Zhang J.** Fault diagnosis of nonlinear analog circuit based on generalized frequency response function and LSSVM classifier fusion // *Mathematical Problems in Engineering*. Hindawi. 2020. Pp. 1–11. DOI: 10.1155/2020/8274570
4. **Deng Y., Zhou Y.** Fault diagnosis of an analog circuit based on hierarchical DVS // *Symmetry*. 2020. no. 12. Pp. 1–19. DOI: 10.3390/sym12111901
5. **Киншт Н.В., Герасимова Г.Н., Кац М.А.** Диагностика электрических цепей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 192 с.
6. **Басан С.Н.** Идентификация параметров удалённых элементов электрических цепей // *Изв. вузов. Электромеханика*. 2019. Т. 62, № 4. С. 97–99.
7. **Farchy S., Gadzheva E., Raykovska L., Kouyoumdjiev T.** Nullator-norator approach to analogue circuit diagnosis using general-purpose analysis programmes // *Internat. J. of Circuit Theory and Applications*. 1995. Vol. 20. Iss. 6. Pp. 571–585.
8. **Djordjevic S.** Analog circuit diagnosis based on the nullor concept and multiport description of the circuit // *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. 2018. no. 95. Pp. 141–149. DOI: 10.1007/s10470-018-1123-7
9. **Курганов С.А., Филаретов В.В.** Формулы для символьной параметрической диагностики линейных электрических цепей // *Электричество*. 2006. № 4. С. 47–60.
10. **Filaretov V., Gorshkov K., Kurganov S.** Generalized Parameter Extraction Method for Analog Circuit Fault Diagnosis // *Proc. of Internat. Conf. on Industrial Engineering ICIE–2016*. Chelyabinsk (Russia). IEEE Xplore, 2016. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911568
11. **Филаретов В.В.** Топологический анализ электронных схем методом выделения параметров // *Электричество*. 1998. № 5. С. 43–52.
12. **Филаретов В.В.** Программа символьного анализа CIRSYM: история создания, структура и функции // *Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: Международ. сб. науч. труд. Ульяновск: УлГТУ*, 2012. Вып. 10. С. 158–171.
13. **Степаненко И.П.** Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.: Энергия, 1977. 672 с.
14. **Chua L.O., Lin P.M.** Computer-aided analysis of electronic circuits: Algorithms and Computational Techniques. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1975. 737 p.
15. **Heinemann R.** PSPICE: Einführung in die elektroniksimitation. München/FRG: Carl Hanser Verlag, 2011. 400 p.

REFERENCES

1. **Liberatore A., Manetti S., Piccirilli M.C.** Network symbolic analysis automated fault diagnosis. *Proc. 1992 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Computer Science*, 1992, Pp. 1169–1172.
2. **Tadeusiewicz M., Halgas S.** A method for fault diagnosis of nonlinear circuits. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2019, Vol. 38, no. 6, Pp. 1770–1781. DOI: 10.1108/COMPEL-03-2019-0101
3. **Zhang J.** Fault diagnosis of nonlinear analog circuit based on generalized frequency response function and LSSVM classifier fusion. *Mathematical Problems in Engineering. Hindawi*, 2020, Pp.1–11. DOI: 10.1155/2020/8274570
4. **Deng Y., Zhou Y.** Fault diagnosis of an analog circuit based on hierarchical DVS // *Symmetry*, 2020, no. 12, Pp. 1–19. DOI: 10.3390/sym12111901
5. **Kinsht N.V., Gerasimova G.N., Kats M.A.** *Diagnostika elektricheskikh tsepey [Diagnostics of electric circuits]*. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1983, 192 p. (rus)
6. **Basan S.N.** Identifikatsiya parametrov udalennykh elementov elektricheskikh tsepey [Identification of parameters of remote elements of electrical circuits]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2019, Vol. 62, no. 4, Pp. 97–99. (rus)

7. Farchy S., Gadzheva E., Raykovska L., Kouyoumdjiev T. Nullator–norator approach to analogue circuit diagnosis using general-purpose analysis programmes. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 1995, Vol. 20, Iss. 6, Pp. 571–585.
8. Djordjevic S. Analog circuit diagnosis based on the nullor concept and multiport description of the circuit. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2018, no. 95, Pp. 141–149. DOI: 10.1007/s10470-018-1123-7
9. Kurganov S.A., Filaretov V.V. Formuly dlya simvolnoy parametriceskoy diagnostiki lineynykh elektricheskikh tsepey [The formulae for symbolic parametric diagnostics of linear electrical circuits]. *Elektrichestvo*, 2006, no. 4, Pp. 47–60. (rus)
10. Filaretov V., Gorshkov K., Kurganov S. Generalized parameter extraction method for analog circuit fault diagnosis. *Proc. of International Conference on Industrial Engineering ICIE–2016*. Chelyabinsk (Russia). IEEE Xplore, 2016, Pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911568
11. Filaretov V.V. Topologicheskii analiz elektronnykh skhem metodom vydeleniya parametrov [Topological analysis of electronic circuits using the method of extraction of parameters]. *Elektrichestvo*, 1998, no. 5, Pp. 43–52. (rus)
12. Filaretov V.V. Programma simvolnogo analiza CIRSVM: istoriya sozdaniya, struktura i funktsii [Cirsym symbolic analysis program: creation history, structure and functions]. *Sintez, Analiz i Diagnostika Elektronnykh Tsepey: Mezhdunarod. sb. nauch. trud.* Ulyanovsk: UIGTU, 2012, Iss. 10, Pp. 158–171. (rus)
13. Stepanenko I.P. *Osnovy teorii tranzistorov i tranzistornykh skhem* [Fundamentals of the theory of transistors and transistor circuits]. Moscow: Energiya Publ., 1977. 672 p. (rus)
14. Chua L.O., Lin P.M. Computer-aided analysis of electronic circuits: Algorithms and Computational Techniques. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1975. 737 p.
15. Heinemann R. PSPICE: Einführung in die elektroniksimulaton. München/FRG: Carl Hanser Verlag, 2011. 400 p.

INFORMATION ABOUT AUTHORS / СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Курганов Сергей Александрович
Sergey A. Kurganov
 E-mail: sakurganov@mail.ru

Недорезов Пётр Владимирович
Pyotr V. Nedorezov
 E-mail: pyatakpy@rambler.ru

Филаретов Владимир Валентинович
Vladimir V. Filaretov
 E-mail: vvfil@mail.ru

Поступила: 12.09.2022; Одобрена: 26.09.2022; Принята: 04.12.2022.

Submitted: 12.09.2022; Approved: 26.09.2022; Accepted: 04.12.2022.