

УДК 621.372.061

ЛОКАЛІЗАЦІЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ У НЕЛІНІЙНИХ КОЛАХ НА ПОСТІЙНОМУ СТРУМІ

В. Рабик

*Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Ген. Тарнавського, 107, 79017, Львів, Україна
RabykV@ukr.net*

Запропоновано багатокроковий метод локалізації несправностей у нелінійних колах на постійному струмі. Розглянуто топологічні умови для визначення елементів схеми, несправності яких можна локалізувати. Наведено приклад багатокрокового методу локалізації несправностей для схеми 2I-HE елемента.

Ключові слова: локалізація несправностей, діагностика, нелінійні кола.

Розглянемо один з підходів локалізації несправностей в аналогових колах на постійному струмі, який ґрунтується на використанні багатокрокового методу діагностики [2]. У цьому разі будемо вважати, що кількість несправностей у колі невелика. Таке обмеження є в більшості випадків [3]. Нехай відома топологія кола та номінальні значення параметрів елементів. За вимірними вузловими потенціалами в доступних та частково доступних вузлах необхідно визначити, які з елементів кола несправні. Максимальна кількість несправностей, що можуть бути локалізовані в колі, визначена кількістю проведених тестів та вимірних вузлових потенціалів [1].

На кожному кроці алгоритму елементи кола розділяють на дві групи, які позначатимемо індексами „1” та „2”. Елементи першої групи вважають справними та використовують разом з вимірними вузловими потенціалами для визначення струмів і напруг елементів групи „2”. Для нелінійних кіл залежність між струмами та напругами елементів можна записати у вигляді

$$\begin{cases} \mathbf{I}^{(1)} = \mathbf{f}_1(\mathbf{U}^{(1)}, \mathbf{X}^{(1)}); \\ \mathbf{I}^{(2)} = \mathbf{f}_2(\mathbf{U}^{(2)}, \mathbf{X}^{(2)}), \end{cases} \quad (1)$$

де $\mathbf{X}^{(1)}, \mathbf{I}^{(1)}, \mathbf{U}^{(1)}, \mathbf{X}^{(2)}, \mathbf{I}^{(2)}, \mathbf{U}^{(2)}$ – вектори статичних параметрів нелінійних елементів, напруг та струмів групи „1” та „2” відповідно.

Для опису топології кола скористаємось співвідношенням

$$\mathbf{A} \times \mathbf{I} = \mathbf{J}, \quad (2)$$

де \mathbf{A} – матриця інцидентій електричного кола, \mathbf{I} – вектор струмів елементів кола, \mathbf{J} – вектор струмів зовнішніх джерел. Вираз (2) запишемо так:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{i1} & \mathbf{A}_{i2} \\ \mathbf{A}_{n1} & \mathbf{A}_{n2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}^{(1)} \\ \mathbf{I}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Співвідношення між вузловими потенціалами \mathbf{U} кола та напругами на елементах \mathbf{V} кола має вигляд

$$\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{V} = \mathbf{U}. \quad (4)$$

Вираз (4) набуде вигляду

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{i1}^T & \mathbf{A}_{n1}^T \\ \mathbf{A}_{i2}^T & \mathbf{A}_{n2}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_i \\ \mathbf{V}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}^{(1)} \\ \mathbf{U}^{(2)} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

З виразів (1)–(5) обчислимо напруги $\mathbf{U}^{(2)}$, струми $\mathbf{I}^{(2)}$ елементів другої групи. Після алгебричних перетворень одержимо систему рівнянь для визначення \mathbf{V}_n :

$$\begin{aligned} & \mathbf{A}_{n2} \mathbf{A}_{i2}^{-L} \mathbf{A}_{i1} \mathbf{f}_1((\mathbf{A}_{i1}^T \mathbf{V}_i + \mathbf{A}_{n1}^T \mathbf{V}_n), \mathbf{X}^{(1)}) - \\ & \mathbf{A}_{n1} \mathbf{f}_1((\mathbf{A}_{i1}^T \mathbf{V}_i + \mathbf{A}_{n1}^T \mathbf{V}_n), \mathbf{X}^{(1)}) = \mathbf{A}_{n2} \mathbf{A}_{i2}^{-1} \mathbf{J}_1. \end{aligned} \quad (6)$$

Для визначення \mathbf{V}_n з (6) необхідно, щоб існувала ліва обернена матриця \mathbf{A}_{i2}^{-L} . Ця умова визначає допустимі компонентні розбиття елементів на групи. Умови існування \mathbf{A}_{i2}^{-L} детально розглянуті в [2]. Для існування матриці \mathbf{A}_{i2}^{-L} необхідно, щоб кожний з елементів другої групи (стовпці матриці \mathbf{A}_{i2}^{-L}) був приєднаний хоча б одним з вузлів до одного з доступних вузлів. Серед доступних або частково доступних вузлів кола не повинно бути вузлів, до яких були б приєднані тільки елементи першої групи (нульова стрічка в матриці \mathbf{A}_{i2}^{-L}).

Вираз (6) – це система нелінійних рівнянь відносно \mathbf{V}_n . Кількість рівнянь дорівнює кількості внутрішніх вузлів схеми. Для її розв'язку використовують метод Ньютона–Бroyдена з продовженням за параметром. Після цього визначають вектор напруг

$$\mathbf{U}^{(2)} = \mathbf{A}_{i2}^T \mathbf{V}_i + \mathbf{A}_{n2}^T \mathbf{V}_n \quad (7)$$

та вектор струмів

$$\mathbf{I}^{(2)} = \mathbf{A}_{i2}^{-L} \left[\mathbf{J}_1 - \mathbf{A}_{i1} \cdot \mathbf{f}_1((\mathbf{A}_{i1}^T \mathbf{V}_i + \mathbf{A}_{n1}^T \mathbf{V}_n), \mathbf{X}^{(1)}) \right]. \quad (8)$$

Тепер легко визначити, які з елементів другої групи є несправними, вважаючи, що всі елементи першої групи справні. Для цього необхідно підставити вектор $\mathbf{U}^{(2)}$ з (7), позначивши його $\mathbf{U}_{обч}^{(2)}$, у вираз (1). У результаті цього отримаємо вектор струмів $\mathbf{I}^{(2)}$, який порівнюємо зі значеннями, одержаними з (8), позначивши їх $\mathbf{I}_{обч}^{(2)}$. Елементи, для яких виконується умова

$$\left| I_i^{(2)} - I_{обч,i}^{(2)} \right| < \varepsilon; i = 1, \dots, n, \quad (9)$$

справні, решта елементів – несправні. Тут n_x – кількість двополюсних елементів у колі, ε – деяка похибка. Зазначимо, що в разі підстановки $U_{обч}^{(2)}$ в (1) значення $\mathbf{X}^{(1)}$ приймають номінальними.

Оскільки наперед точно невідомо, що всі елементи групи „1” є справними то цей крок алгоритму повторюють з різним розбиттям елементів на групи. В результаті порівняння результатів усіх кроків алгоритму визначають несправні елементи. Для лінійних елементів кіл (резисторів, керованих джерел напруги та струму), крім локалізації, можливе і визначення їхніх параметрів. Для нелінійних елементів таке однозначне визначення на етапі локалізації неможливе.

Розглянемо локалізацію несправностей за допомогою багатокрокового методу діагностики на прикладі 2I-HE елемента, схема якого зображена на рис. 1.

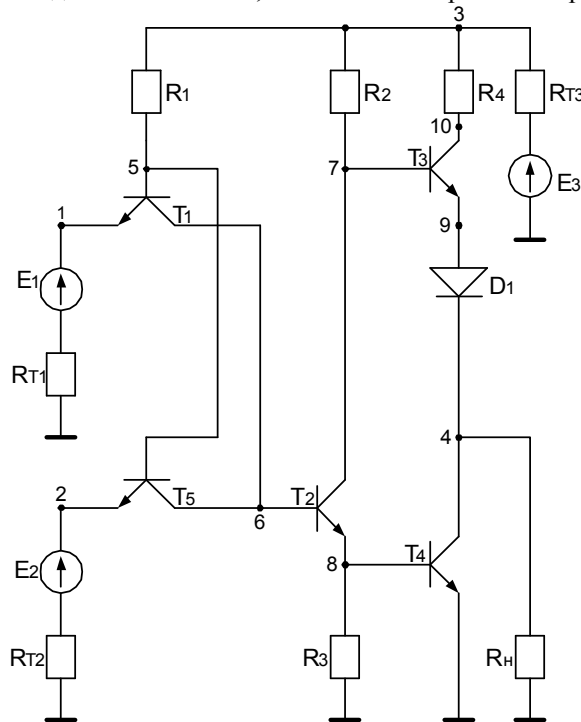


Рис. 1. Принципова схема 2I-HE елемента

Схема заміщення цього кола з використанням моделі Еберса–Молла зображена на рис. 2. У цьому колі вузли 1, 2, 3 – доступні, а вузли 4, 9, 10 – частково доступні ($n_A = 3, n_p = 3, n_i = 4$). Вузли 5, 6, 7, 8 – внутрішні. Максимальна кількість несправних елементів, які можна локалізувати в колі, - $n_f \leq 6$. Загальна кількість елементів, які діагностують, в колі $n_x = 25$. Деякі з них

містять по два невідомі параметри. Номінальні значення параметрів елементів кола такі:

$E_1=5$ В;	$E_2=5$ В;	$R_{T1}=5$ кОм;	$R_{T2}=5$ кОм;
$E_3=5$ В;	$R_{T3}=5$ кОм;	$R_1=10,0$ кОм;	$R_2=2,5$ кОм;
$R_3=2,0$ кОм;	$R_4=0,2$ кОм;	$D(I_{od}=0,1$ мкА;	$U_{od}=0,024$ В);
T_1, T_2, T_3, T_4, T_5	$(I_{oc}=0,2$ нА;	$I_{ok}=0,055$ нА;	$U_{oc}=0,033$ В;
	$U_{ok}=0,03$ В;	$\alpha_i=0,92$;	$\alpha_N=0,99$).

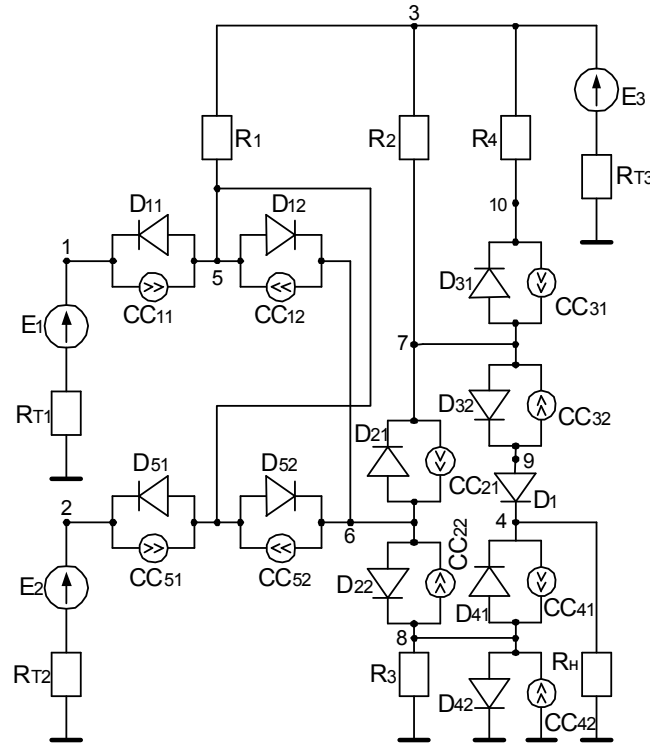


Рис. 2. Схема заміщення 2I-НЕ елемента

Уведемо в коло несправності так, щоб їхня кількість не перевищувала $n_f \leq 6$ ($R_2=0,5$ кОм). Проаналізуємо несправне коло за постійним струмом: $V_1=4,992$ В; $V_2=4,992$ В; $V_3=1,707$ В; $V_4=0,640$ В; $V_9=0,833$ В; $V_{10}=1,646$ В. З усіх n_x елементів кола локалізувати несправності можна в таких елементах: $R_1, R_2, R_4, D_{11}, D_{51}, CC_{11}, CC_{51}, D_{31}, D_{32}, CC_{31}, CC_{32}, D, D_{41}, CC_{41}$. Такий вибір елементів зумовлений топологічною умовою існування матриці A_{f1}^{-2} .

Для локалізації несправностей у колі використаємо багатокроковий алгоритм діагностики.

Крок 1. Розбиваємо всі елементи кола на дві групи. В другу групу об'єднуємо такі елементи: $R_1, R_4, D_{11}, D_{51}, D, D_{41}$. На першому етапі цього кроку визначаємо потенціали внутрішніх вузлів, розв'язуючи систему нелінійних рівнянь. За

початкове наближення вибираємо значення потенціалів внутрішніх вузлів справної схеми, одержані за допомогою програми аналізу за постійним струмом:

$$V_5^0=2.00 \text{ В}; V_6^0=1.565 \text{ В}; V_7^0=1.036 \text{ В}; V_8^0=0.785 \text{ В}.$$

Похибку розв'язування системи нелінійних рівнянь вибираємо $\varepsilon=0,1\text{мВ}$. У результаті розрахунку одержуємо такі значення:

$$\mathbf{V}_n=[1.925; 1.483; 0,948; 0.698]^T \text{ (В)};$$

$$\mathbf{U}_{обч}^{(2)}=[-0.218; 0.061; -3.066; -3.066; 0.058; 0.193]^T \text{ (В)};$$

$$\mathbf{I}^{(2)}=[-0.021; 0.306; -0.2*10^{-9}; -0.2*10^{-9}; 0.428*10^{-6}; 0.309]^T \text{ (мА)};$$

$$\mathbf{I}_{обч}^{(2)}=[0.355; 0.77*10^{-9}; 0.163; 0.163; 0.309; 0.72*10^{-7}]^T \text{ (мА)}.$$

Унаслідок порівняння векторів струмів $\mathbf{I}^{(2)}$ та $\mathbf{I}_{обч}^{(2)}$ на перший погляд, можна зробити висновок, що всі шість елементів несправні. Обчислене значення елемента $R_1=-0.218/0.355=-0.614$ кОм. Оскільки опір резистора R_1 не може бути від'ємним, то серед елементів першої групи є несправний елемент. На наступному кроці змінюємо склад елементів першої та другої груп.

Крок 2. До другої групи належать такі елементи: $R_2, R_4, D_{11}, D_{51}, D, D_{41}$. На цьому кроці локалізації отримуємо

$$\mathbf{V}_n=[1.703; 1.400; 1.532; 0.698]^T \text{ (В)};$$

$$\mathbf{U}_{обч}^{(2)}=[0.175; 0.061; -3.289; -3.289; 0.058; 0.193]^T \text{ (В)};$$

$$\mathbf{I}^{(2)}=[0.069; 0.306; -0.2*10^{-9}; -0.2*10^{-9}; 0.43*10^{-6}; 0.309]^T \text{ (мА)};$$

$$\mathbf{I}_{обч}^{(2)}=[0.343; 0.315; 0.76*10^{-4}; 0.76*10^{-4}; -0.97*10^{-2}; 0.319]^T \text{ (мА)}.$$

На підставі порівняння векторів струмів $\mathbf{I}^{(2)}$ та $\mathbf{I}_{обч}^{(2)}$ бачимо, що елемент R_2 несправний: $R_2=0,175/0,343=0,510$ кОм.

Відмінність у значеннях і знаках струмів $\mathbf{I}^{(2)}$ та $\mathbf{I}_{обч}^{(2)}$ елементів D_{11}, D_{51}, D_{41} пояснюють тим, що вони перебувають в закритому стані.

Елементи R_1 та R_2 одним з виводів приєднані до вузла 3 (доступного), а іншими - до вузлів 5, 7 (внутрішніх). Оскільки елемент R_2 несправний, то на наступних кроках локалізації несправностей його необхідно зачислити до елементів групи "2". А це означає, що елемент R_1 на жодному з кроків локалізації не можна включати в другу групу елементів, бо в цьому випадку не буде існувати матриця \mathbf{A}_{il}^{-2} .

Крок 3. Другу групу формують елементи $R_2, R_4, CC_1, CC_{51}, D_{41}, D$. На цьому кроці отримуємо такі результати:

$$\mathbf{V}_H = [1.703; 1.400; 1.532; 0.698]^T \text{ (В)};$$

$$\mathbf{U}_{обч}^{(2)} = [0.069; 0.306; 0.42 \cdot 10^{-6}; 0.309; 0.15 \cdot 10^{-2}; 0.15 \cdot 10^{-2}]^T \text{ (В)};$$

$$\mathbf{I}^{(2)} = [0.175; 0.061; 0.058; 0.193; 3.289; 3.289]^T \text{ (мА)};$$

$$\mathbf{I}_{обч}^{(2)} = [0.343; 0.315; 0.76 \cdot 10^{-4}; 0.76 \cdot 10^{-4}; -0.97 \cdot 10^{-2}; 0.319]^T \text{ (мА)}.$$

Порівнянням на цьому кроці векторів струмів $\mathbf{I}^{(2)}$ та $\mathbf{I}_{обч}^{(2)}$ отримуємо, що елемент R_2 несправний: $R_2 = 0,175/0,343 = 0,510$ кОм.

Крок 4. До другої групи вводимо такі елементи: $R_2, R_4, D_{11}, D_{51}, D, CC_{41}$. У разі локалізації несправностей на цьому кроці отримуємо такі результати:

$$\mathbf{V}_H = [1.703; 1.400; 1.532; 0.698]^T \text{ (В)};$$

$$\mathbf{U}_{обч}^{(2)} = [0.175; 0.061; -3.289; -3.289; 0.193; -0.058]^T \text{ (В)};$$

$$\mathbf{I}^{(2)} = [0.069; 0.306; -2.0 \cdot 10^{-9}; -2.0 \cdot 10^{-9}; 0.309; 0.309]^T \text{ (мА)};$$

$$\mathbf{I}_{обч}^{(2)} = [0.342; 0.315; 0.76 \cdot 10^{-4}; 0.76 \cdot 10^{-4}; 0.319; 0.319]^T \text{ (мА)}.$$

На цьому кроці елемент R_2 несправний: $R_2 = 0,175/0,343 = 0,510$ кОм.

Крок 5. Другу групу утворюють елементи $R_2, D_{11}, D_{51}, D_{31}, D, CC_{41}$. На цьому кроці отримуємо такі результати:

$$\mathbf{V}_H = [1.703; 1.400; 1.532; 0.698]^T \text{ (В)};$$

$$\mathbf{U}_{обч}^{(2)} = [0.175; -3.289; -3.289; -0.113; 0.193; -0.058]^T \text{ (В)};$$

$$\mathbf{I}^{(2)} = [0.069; -2.0 \cdot 10^{-9}; -2.0 \cdot 10^{-9}; 0.69 \cdot 10^{-7}; 0.309; 0.309]^T \text{ (мА)};$$

$$\mathbf{I}_{обч}^{(2)} = [0.352; 0.76 \cdot 10^{-4}; 0.76 \cdot 10^{-4}; 0.97 \cdot 10^{-2}; 0.319; 0.319]^T \text{ (мА)}.$$

У разі порівняння векторів струмів $\mathbf{I}^{(2)}$ та $\mathbf{I}_{обч}^{(2)}$ отримуємо, що елемент R_2 несправний: $R_2 = 0,175/0,352 = 0,497$ кОм.

Крок 6. Друга група – елементи $R_2, D_{11}, D_{51}, CC_{31}, D_{41}, D$. Після розрахунків на цьому кроці локалізації отримуємо:

$$\mathbf{V}_H = [1.703; 1.400; 1.532; 0.698]^T \text{ (В)};$$

$$\mathbf{U}_{обч}^{(2)} = [0.175; -3.289; -3.289; 0.058.193; 0.114]^T \text{ (В)};$$

$$\mathbf{I}^{(2)} = [0.069; -2.0 \cdot 10^{-9}; -2.0 \cdot 10^{-9}; 0.69 \cdot 10^{-7}; 0.309; 0.309]^T \text{ (мА)};$$

$$\mathbf{I}_{обч}^{(2)} = [0.352; 0.76 \cdot 10^{-4}; 0.76 \cdot 10^{-4}; -0.97 \cdot 10^{-2}; 0.319; 0.306]^T \text{ (мА)}.$$

Після порівняння векторів струмів $\mathbf{I}^{(2)}$ та $\mathbf{I}_{обч}^{(2)}$ отримуємо, що елемент R_2 несправний: $R_2 = 0,175 / 0,352 = 0,497$ кОм.

Отже, на підставі аналізу результатів усіх кроків локалізації з'ясовано, що серед елементів, які можна локалізувати, несправний елемент R_2 .

1. *Благитко Б.Я., Рабык В.Г.* Основы теории диагностики аналоговых электрических цепей по постоянному току // Теор. электротехника. 1988. Вып. 44. С. 121–129.
2. *Благитко Б., Бригілевич В., Рабик В.* Багатокроковий метод діагностики лінійних електричних кіл // Доп. спільної укр.-пол. школи-семінару. Актуальні проблеми теоретичної електротехніки: наука і дидактика. Львів, Алушта, 2001. С. 1–3.
3. *Бэндлер Дж. У., Салама А.Э.* Диагностика неисправностей в аналоговых цепях // ТИИЭР - 1985. №8. С. 35–87.

LOCALIZATION OF THE FAULTS IN NONLINEAR DC CIRCUITS

V. Rabyk

*Ivan Franko Lviv National University,
Tarnavsky Str. 107, UA-79017 Lviv, Ukraine
RabykV@ukr.net*

The multistep method of localization of faults is offered in nonlinear DC circuits. Topology conditions are considered for determination of elements the faults of which can be localized. The example of multistep method of localization of faults is presented for the circuits of 2I-HE element.

Key words: localization faults, diagnostic, nonlinear circuits.

Стаття надійшла до редколегії 01.11.2004

Прийнята до друку 01.06.2004