

УДК 621.3.011.7

DOI: 10.32626/2308-5878.2021-22.81-89

**К. М. Ключка\***, канд. техн. наук,

**Л. О. Митько\*\***, канд. фіз.-мат. наук

\* Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси,

\*\* Інститут проблем моделювання в енергетиці

імені Г. Є. Пухова НАН України, м. Київ

## **ПРОЦЕДУРА ЛОКАЛІЗАЦІЇ НЕСПРАВНОГО ЕЛЕМЕНТА В ЛІНІЙНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ З ПАСИВНИМИ ДВОХПОЛЮСНИКАМИ**

Станом на теперішній час, аналіз технічного стану електричних схем передбачає використання широких можливостей обчислювальної техніки. Важливою умовою при цьому є здатність діагностувальної системи здійснювати процес діагностування в режимі реального часу.

До окремого класу об'єктів діагностування можна віднести пасивні ланцюги, що складаються тільки з елементів з резистивною провідністю та не містять власних джерел енергії. Для подібних ланцюгів створені методи діагностування, які полягають у визначенні параметрів всіх елементів ланцюга і потребують доступу до всіх вузлів схеми, що перевіряється. При цьому процедура діагностування стає досить трудомісткою, оскільки визначаються параметри усіх без винятку елементів ланцюга.

Значно зменшити кількість обчислювальних операцій при проведенні діагностування, дозволяє алгоритм заснований на застосуванні методу навчальних та перевірочних характеристик. Вказаний метод, будучи заснованим на методі підсхем, був спочатку створений для діагностування неперервних систем автоматичного регулювання, а потім був поширений і на самі електричні кола. В якості підсхем, в схемах електричних кіл виділяються підсхеми, для яких перевіряються гіпотези. Сутність застосування методу полягає в тому, що на підставі значень навчальних характеристик, відповідно до гіпотези за формулою Фостера, визначаються значення параметрів несправних елементів. Потім, маючи значення параметрів всіх елементів ланцюга, визначається оцінка значень навчальних характеристик, при збігу яких із вимірними значеннями — гіпотеза приймається, інакше — гіпотеза відкидається.

В представленій статті, на конкретному прикладі показано, що застосування методу навчальних та перевірочних характеристик дозволяє суттєво знизити трудомісткість процедури діагностування як на етапі проведення вимірювань, так і на етапі обчислень.

Результати обчислювальних експериментів підтверджують ефективність застосування методу навчальних та перевірочних

характеристик, що в підсумку дає можливість більш ефективного використання засобів обчислювальної техніки.

**Ключові слова:** *лінійне електричне коло, об'єкт діагностування, пасивний двохполюсник, навчальні і перевірочні характеристики.*

**Вступ.** Дослідження процесів в електричних колах, зокрема проведення в них діагностичних процедур, є одним із досить важливих розділів електротехніки.

Знання дійсного технічного стану об'єкта перевірки є обов'язковим, як для його поточного функціонування, так і для подальшого прогнозу функціонування, тому розвиток методів технічного діагностування електротехнічних пристроїв є актуальним завданням в галузі теоретичної електротехніки.

В теперішній час аналіз технічного стану електричних кіл передбачає використання широких можливостей обчислювальної техніки. Тому, особливого значення набуває математичний опис об'єкту діагностики, вибір та побудова його вдалої математичної моделі, яка з найбільшою повнотою відображує реальні процеси чи явища, що протікають в компонентах електричних ланцюгів.

Сучасні види та методи діагностувальних процедур в електричних колах повинні враховувати зростаючу складність та все більш жорсткі вимоги до отримуваних результатів. Пошук оптимальних видів та ефективних методів діагностики, привів до створення цілого ряду методів, які отримали загальне визнання [1, 2].

**Виклад основного матеріалу.** До окремого класу об'єктів діагностування можна віднести пасивні ланцюги, що складаються тільки з резисторів і не містять власних джерел енергії. Для таких ланцюгів існують методи діагностування, які полягають у визначенні параметрів всіх елементів ланцюга і потребують доступу до всіх вузлів схеми, що перевіряється [3-5]. Оскільки власних джерел енергії пасивні ланцюги не містять, то виникає необхідність використання зовнішніх джерел ЕРС або струму. При цьому, для того, щоб уникнути вимірювань струмів у вітках схеми, необхідна кількість рівнянь набирається шляхом підключення зовнішніх джерел до різних вузлів ланцюга та вимірювання струмів, що споживаються від них та напруги у вузлах.

В [4, 6] наведено метод вузлових опорів, заснований на експериментальному визначенні матриці  $\mathbf{Z} = \mathbf{Y}^{-1}$ , де  $\mathbf{Y}$  — матриця вузлових провідностей ланцюга. Якщо ланцюг, що описується методом вузлових опорів

$$\mathbf{Y} \mathbf{V} = \mathbf{I} \quad (1)$$

збуджується системою ортогональних векторів струмів  $\{I_1, I_2, \dots, I_n\}$

виду  $\mathbf{I}_k = [0 \dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0]^T$ , то  $k$ -й рядок дорівнює 1.

Можна скласти систему рівнянь виду

$$\mathbf{Y}[\mathbf{V}_1 \dot{\vdots} \mathbf{V}_2 \dot{\vdots} \dots \dot{\vdots} \mathbf{V}_n] = \mathbf{E}. \quad (2)$$

З (2) можна отримати

$$\mathbf{Y}[\mathbf{V}_1 \dot{\vdots} \mathbf{V}_2 \dot{\vdots} \dots \dot{\vdots} \mathbf{V}_n]^{-1}$$

звідки визначається матриця  $\mathbf{Y}$ , а з неї значення параметрів всіх елементів.

Обсяг обчислень можна зменшити, якщо врахувати, що ланцюг — взаємний та матриця  $\mathbf{Y}$  для неї симетрична. Якщо використувати одночасно кілька джерел енергії, можна ще більше скоротити обсяг роботи, використовуючи методи узагальнених вузлових опорів і вузлових провідностей [6].

В [3] наведено метод визначення параметрів всіх елементів пасивного ланцюга з використанням формули Фостера.

Позначимо:  $\mathbf{Y} = [y_1 \dots y_0]^T$  — вектор провідностей віток ланцюга,  $\mathbf{Z} = [Z_1 \dots Z_0]^T$  — вектор опорів, виміряних на кінцях кожної вітки. Тоді співвідношення

$$(\mathbf{Y}, \mathbf{Z}) = n - 1, \quad (3)$$

де  $n$  — число вузлів ланцюга, називається формулою Фостера [7].

Необхідне число рівнянь для визначення вектора  $\mathbf{Z}$  [3] отримується шляхом підключення паралельно віткам ланцюга елементів з відомими параметрами. Якщо при  $i$ -тому варіанті підключення елемент з провідністю  $Y_{im}^0$  буде підключений паралельно до  $m$ -ї вітки, то (3) набуде вигляду

$$\sum_{m=1}^p (Y_m + Y_{im}^0) \cdot Z_{im} = n - 1, \quad (4)$$

або

$$\sum_{m=1}^p Y_m Z_{im} = n - 1 - \sum_{m=1}^r Y_{im}^0 Z_{im},$$

де  $Z_{im}$  — опір, що виміряний на кінцях  $m$ -ї вітки при  $i$ -му варіанті підключення.

Якщо кількість варіантів підключення дорівнює  $p$ , то отримаємо систему рівнянь

$$\begin{bmatrix} Z_1^T \\ \vdots \\ Z_i^T \\ \vdots \\ Z_p^T \end{bmatrix} \mathbf{Y} = \mathbf{D}, \quad (5)$$

де  $Z_i = [Z_{i1} Z_{i2} \dots Z_{ip}]^T$  — вектор опорів, що виміряні на кінцях віток, при  $i$ -му варіанті підключення зовнішніх елементів,  $Y = [Y_1 Y_2 \dots Y_p]^T$  — вектор провідностей віток. Вектор  $D$  визначається наступним чином:

$$D = [d_1 d_2 \dots d_i \dots d_p]^T,$$

$$d_i = n - 1 - (Z_i, Y_i^0),$$

где  $Y_{im}^0$  — вектор значень провідностей зовнішніх елементів при  $i$ -му варіанті їх підключення.

З рівняння (5) можна отримати вектор  $Y$  параметрів всіх елементів.

На практиці, одночасно несправним може бути лише невелика кількість елементів, що визначається кратністю несправності. І тут немає необхідності визначати параметри всіх елементів, а можна скористатися методом навчальних і перевірочних характеристик (НПХ) [8], перевіряючи гіпотези про групи несправних елементів.

Для застосування методу НПХ необхідно вибрати навчальні та перевірочні характеристики. Як навчальні характеристики слід вибрати значення опорів, виміряних між кінцями всіх віток, а як перевірочні характеристики — значення опорів між парами будь-яких вузлів ланцюга, що не увійшли в множину навчальних характеристик. Сутність застосування методу НПХ полягає в тому, що на підставі значень навчальних характеристик, відповідно до гіпотези за формулою Фостера, визначаються значення параметрів несправних елементів. Потім, маючи значення параметрів всіх елементів ланцюга, визначається оцінка значень навчальних характеристик, при збігу яких із виміряними значеннями — гіпотеза приймається, інакше — гіпотеза відкидається.

Значення параметрів передбачуваних несправних елементів визначають за формулою

$$\hat{Y}_k = Y_k + Z_k^{-1} A, \quad (6)$$

де  $\hat{Y}_k$  —  $l$ -мірний вектор значень параметрів елементів, які вважаються несправними у відповідності з гіпотезою  $H_k$ ,  $Y_k$  —  $l$ -мірний вектор номінальних значень параметрів елементів, що перевіряються в гіпотезі  $H_k$ ,

$$Z_k = \begin{bmatrix} Z_1, m_1 \dots Z_1, m_l \\ Z_2, m_1 \dots Z_2, m_l \\ \dots \\ Z_l, m_1 \dots Z_l, m_l \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{A} = [a_{i_1} \ a_{i_2} \ \dots \ a_{i_l}]^T, \quad (8)$$

$$a_i = n - 1 - \left( (Y + Y_i^0), Z_i \right).$$

З (7) випливає, що кількість варіантів підключення зовнішніх елементів з відомими параметрами повинна бути не менше ніж кратність несправності  $l$ .

Для кожної гіпотези  $H_k$  з (6) визначається оцінка значень параметрів елементів  $\hat{Y}_k$ , включених до цієї гіпотези. Інші елементи вважаються справними, та їх параметрам присвоюються номінальні значення. Порівнюючи вимірне та розраховане значення навчальних характеристик, приймаються або відкидаються висунуті гіпотези.

Застосування методу НПХ дозволяє знизити трудомісткість діагностування як на етапі проведення вимірювань, так і на етапі обчислень.

При проведенні вимірювань з використанням методу НПХ, опору вимірюється для всіх віток і кожного варіанта підключення зовнішніх елементів, а число цих підключень дорівнює кратності несправності. При визначенні параметрів всіх елементів число підключень, а значить і вимірювань опорів для кожної вітки, дорівнює кількості віток схеми. Отже, при застосуванні методу НПХ знижується кількість вимірювань, що проводяться.

Після проведення вимірювань метод НПХ вимагає обчислення вектора  $\mathbf{A}$ , який розраховується один раз перед початком перевірки всіх гіпотез. Потім, залежно від методу діагностування, здійснюється розв'язання однієї системи рівнянь (5) для визначення параметрів всіх елементів або розв'язання декількох систем рівнянь (6) для перевірки гіпотез.

Порівняємо трудомісткості цього етапу за кількістю необхідних операцій множення. Розв'язання систем лінійних рівнянь (5) і (6) методом Гаусса з  $LU$  — розкладанням вимагає  $n_{\text{множ}}$  операцій множення

$$n_{\text{множ}} = \frac{1}{6} (2n^3 - 3n^2 + n),$$

де  $n$  — кількість рівнянь у системі. Для великих схем [9] отримаємо

$$n_{\text{множ}} \approx \frac{n^3}{3}.$$

Враховуючи, що кількість віток дорівнює  $p$ , для системи (5) отримаємо

$$n'_{\text{множ}} \approx \frac{p^3}{3}.$$

Кількість систем рівнянь (6) дорівнює загальній кількості гіпотез про різні  $l$ -кратні несправності  $C_p^l$ . Таким чином отримаємо

$$n''_{\text{множ}} = C_p^l \cdot \frac{1}{6} (2l^3 - 3l^2 + l).$$

Наприклад, для електричного кола, що містить 100 віток, при перевірці гіпотез про дворазові несправності можна отримати:

$$n'_{\text{ум}} \approx \frac{(100)^3}{3} \approx 333 \cdot 10^3,$$

$$n''_{\text{ум}} = \frac{100 \cdot 99}{2 \cdot 6} (2 \cdot 2^3 - 3 \cdot 2^2 + 2) \approx 5 \cdot 10^3,$$

звідки слідує, що застосування методу НПХ значно знижує трудомісткість обчислень при малих кратностях несправності порівняно з випадком визначення значень параметрів всіх елементів.

**Приклад.** Розглянемо пасивний електричний ланцюг, наведений на рис. 1, елементи якого мають такі параметри

$$Y_1 = 1 \text{ См},$$

$$Y_2 = 0,5 \text{ См},$$

$$Y_3 = 0,333 \text{ См},$$

$$Y_4 = 0,2 \text{ См},$$

$$Y_5 = 0,2 \text{ См},$$

тобто  $Y = (1 \ 0,5 \ 0,33 \ 0,25 \ 0,2)^T$ .

Нехай у цьому ланцюзі можлива дворазова несправність, і в результаті несправності змінилися значення  $Y_2$  і  $Y_5$  таким чином, що вони набрали значення відповідно:

$$Y_2^f = 0,333, \ Y_5^f = 0,25.$$

Як навчальні характеристики можна вибрати значення опорів, виміряні між кінцями всіх віток, а в якості перевірконої характеристики — величину опору, виміряного між вузлами 1 і 3 тобто  $Z_{\text{пр}} = 1,412 \text{ Ом}$ .

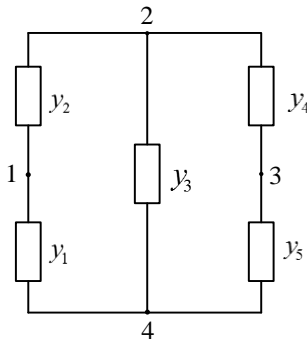


Рис 1. Пасивний електричний ланцюг

Оскільки кратність несправності дорівнює 2, то два зовнішні елементи з провідностями 0 і 1 по черзі підключаються паралельно  $Y_4$

$$Y_1^0 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T,$$

$$Y_2^0 = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)^T.$$

Вимірюються опори між кінцями всіх віток схеми, що перевіряється, для обох варіантів підключення зовнішніх елементів

$$Z_{11} = 0,838 \text{ Ом}, \quad Z_{13} = 1,416 \text{ Ом},$$

$$Z_{12} = 1,545 \text{ Ом}, \quad Z_{14} = 2,353 \text{ Ом},$$

$$Z_{15} = 2,353 \text{ Ом},$$

$$Z_{21} = 0,829 \text{ Ом}, \quad Z_{23} = 1,264 \text{ Ом},$$

$$Z_{22} = 1,462 \text{ Ом}, \quad Z_{24} = 0,702 \text{ Ом},$$

$$Z_{25} = 1,544 \text{ Ом},$$

Таблиця 1

*Результати розрахунків*

№№ гіпотези	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Підозрілі вітки $i, j$	1, 2	1, 3	1, 4	1, 5	2, 3	2, 4	2, 5	3, 4	3, 5	4, 5
$\hat{Y} = \begin{bmatrix} \hat{Y}_i \\ \hat{Y}_j \end{bmatrix}$	0,071 0,911	0,487 0,533	0,785 0,267	0,731 0,235	0,016 0,759	0,375 0,272	0,333 0,249	0,184 0,280	0,556 0,125	0,339 0,051
$\hat{Z}_{np} = \begin{vmatrix} Z_{np} - \hat{Z}_{np} \end{vmatrix}$	1,961 0,549	1,123 0,289	1,329 0,083	1,331 0,081	1,129 0,283	1,386 0,027	1,412 0	1,577 0,165	1,028 0,384	1,408 0,004

Розраховуються значення елементів вектора  $A$  за виразом (8)

$$A = (-0,142 \ -0,168)^T.$$

Далі висувають гіпотези про несправності різних пар віток (всього розглядається  $C_5^2 = 10$  гіпотез). Для кожної гіпотези розв'язується система рівнянь (6) і, в результаті, визначається вектор  $\hat{Y}$ . Результати розрахунків наведено у таблиці 1.

Як міру близькості перевірюваних характеристик можна вибрати величину  $\begin{vmatrix} Z_{np} - \hat{Z}_{np} \end{vmatrix}$ . Виходячи з даних таблиці 1, приймається гіпотеза 7 про несправність елементів 2 і 5, які мають значення відповід-

но 0,333 См і 0,249 См, що узгоджується з вихідними даними. Якщо враховувати обмежену точність вимірів і помилку обчислення, то гіпотези 7 і 10 маловідмінні. У цьому випадку слід прийняти обидві ці гіпотези, а фактично несправні елементи визначити шляхом розриву ланцюга та вимірювання його параметрів.

**Висновок.** З розглянутого в представленій роботі прикладу слідує, що застосування методу НПХ дає змогу значно знизити трудомісткість обчислень при малих кратностях несправності, порівняно з випадком визначення значень параметрів всіх елементів. Зокрема, для розглянутого прикладу, кількість необхідних операцій множення, завдяки застосуванню методу НПХ, вдалося зменшити більш ніж в 60 разів, що може свідчити про високу ефективність методу НПХ.

### Список використаних джерел:

1. Верлань А. Ф., Добра И. Д., Игначенко А. А. Комплексная автоматизация процессов диагностирования объектов энергетики. *Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф. «Математическое моделирование в энергетике»*. Киев: ИПМЭ АНУ, 1990. Ч. 1. С. 173-174.
2. Бондаренко В. М., Редковец С. Н., Кашпировский А. И. Методы, алгоритмы и программы диагностики электрических цепей. Киев, 1985. 53 с. (Препринт/АН УССР, Ин-т электродинамики; № 428).
3. Roytman L. M., Swamy M. N. S. Diagnosis of passive networks. *IEEE Int. Symp. Circuits and Systems*. 1981. P. 291-292.
4. Roytman L. M., Swamy M. N. S. Some properties of orthonormal excitations of the circuit and the calculation of the circuit elements. *IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems*. 1981. P. 289-291.
5. Tucker R. E., McNamee L. P. Coomputer aided design application to fault detection and isolation techniques. *IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems*. P. 684-687.
6. Лозинський О. Ю., Марущак Я. Ю., Костробій П. П. Розрахунок надійності електроприводів. Львів: ДУ «Львівська політехніка», 1999. 234 с.
7. Foster R. An extension of a network theorem. *IRE Trans., CT-8*. 1961. P. 76-77.
8. Верлань А. А., Положаєнко С. А., Осман И. Х. Локалізація несправних електронних підсхем методом навчаючих і провєрочних характеристик. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Техн. науки: зб. наук. праць*. Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський націон. ун-т ім. Івана Огієнка, 2008. Вип. 1. С. 140-144.
9. Чуа Л. О., Лин П.-М. Машинный анализ электронных схем: алгоритмы и вычислительные методы. Москва: Энергия, 1980. 640 с.

## DETECTION PROCESS OF A FAULTY ELEMENT IN A LINEAR PASSIVE TWO-PORT NETWORK

Currently the analysis of a technical condition of electrical circuits involves the use of extensive capabilities of computer technology. An im-



portant condition is the ability of the diagnostic system to execute a real-time diagnostic process.

A specific class of diagnostic objects includes passive circuits built only of elements with resistive conductivity and do not contain their own energy sources. Diagnostic methods have been developed for such circuits; those methods are based on determining the parameters of all elements of the circuit and require access to all nodes of the circuit under test. In this case, the diagnostic procedure becomes quite time consuming, because the parameters of all elements of the circuit without exception are to be determined.

Alternatively, the algorithm based on the application of the training and verification characteristics method allows to significantly reduce the number of computational operations during the diagnosis. This method, being based on the method of subcircuits, was first developed to diagnose continuous automatic control systems, and then was extended to the circuits themselves. The mentioned subcircuits are allocated in electrical schemes subcircuits for which hypotheses are tested. The essence of the method is that based on the values of the training characteristics, according to the hypothesis by the Foster formula, the values of the parameters of faulty elements are determined. Then, having the values of the parameters of all elements of the circuit, the assessment of the values of training characteristics is executed; if the mentioned values match measured ones the hypothesis is accepted, otherwise the hypothesis is rejected.

In the article has been described, based on a specific example, that the application of the training and verification characteristics method allows to considerably reduce the complexity of diagnosing procedure both at a stage of executing measurements, and at a stage of calculations.

The results of computational experiments have shown the effectiveness of the training and verification characteristics method; which ultimately allows for more efficient use of computer technology.

**Key words:** *linear electric circuit, diagnostic object, passive two-port network, training and verification characteristics.*

Отримано: 11.10.2021