

Особливості параметричної ідентифікації ARC-кіл у частотній області

Богдан Благітко¹, Ігор Заячук², Василь Рабик³, Любомира Кіт⁴

¹ к. т. н., доцент, Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. ген. Тарнавського, 107, Львів, 79017, e-mail: blagitko@electronics.wups.lviv.ua

² к. т. н., Центр математичного моделювання ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дж. Дудасва, 15, Львів, 79005, e-mail: igorzaj@litech.lviv.ua

³ к. т. н., доцент, Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. ген. Тарнавського, 107, Львів, 79017

⁴ Центр математичного моделювання ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дж. Дудасва, 15, Львів, 79005

Розглянуто особливості параметричної ідентифікації ARC-кіл у частотній області за результатами вимірювання вузлових потенціалів. Для розв'язування проблеми неоднозначних груп запропоновано використовувати тестування в доступних і частково доступних вузлах кола. Запропонований алгоритм, який враховує під'єднання на кожному етапі тестування пасивних тестових елементів, дає можливість виключити вплив неоднозначних груп елементів і однозначно визначити параметри елементів за вимірними вузловими потенціалами. Описано методику та результати параметричної ідентифікації ARC-фільтра нижніх частот за вимірними амплітудами та фазами вузлових потенціалів.

Ключові слова: параметрична ідентифікація, електричне коло, вузловий потенціал, багатотестовий метод, діагностика несправностей електричних кіл.

Вступ. У процесі параметричної ідентифікації електричних кіл у частотній області практичні питання стають домінуючими. До них, насамперед, необхідно віднести вибір вимірюваних величин, частотних точок, тестових джерел і їх внутрішніх опорів, тестових елементів і їх параметрів, а також особливості розв'язування рівнянь параметричної ідентифікації [1].

Перехід від теоретичної до практичної параметричної ідентифікації доволі складний. Для правильного вибору параметрів вимірювальної апаратури під час параметричної ідентифікації електричних кіл дуже важливо оцінити залежність похибки визначення параметрів елементів кола, що ідентифікуються, від значення похибки вимірювального приладу. У роботі [2] проаналізовано метод, який полягає в моделюванні залежності похибки діагностованих параметрів від похибки дискретності АЦП, що використовується для вимірювання напруг. Згаданий вище метод можна використовувати для тестування методів параметричної ідентифікації та прогнозування похибки вимірювального приладу, виходячи з допустимої похибки ідентифікації параметрів елементів кола.

У праці [3] розглянуто три методи вибору частот синусоїдальних тестових сигналів, що використовують для діагностики несправностей аналогових електричних кіл. Два з них базуються на аналізі чутливості та можуть бути частково

використані в лінійних електричних колах, враховуючи знання та досвід дослідника. Третій метод забезпечує вибір вхідних частот під час тестування досліджуваного кола без врахування будь-яких гіпотез і знань дослідника про коло.

Проблему ідентифікації параметрів реального кола описано в роботі [4]. Під час її розв'язування особливо складною є проблема неоднозначності груп параметрів елементів, тобто однозначності визначення параметрів елементів кола. Група неоднозначності — це сукупність параметрів, які не можуть бути відокремлені один від одного за результатами вимірювань, проведених під час тестування у вибраних вузлах кола. У цьому випадку для отримання єдиного розв'язку задачі параметричної ідентифікації необхідно усунути вплив груп неоднозначності.

У роботі [5] запропоновано багатотестовий метод параметричної ідентифікації електронних кіл по постійному струму, який розв'язує проблему неоднозначності. У згаданому методі по чергово до кожного з доступних вузлів кола під'єднують тестові джерела або тестові зразкові резистори.

У цій статті пропонується розв'язувати проблему неоднозначності параметричної ідентифікації електричних ARC-кіл у частотній області модифікованим багатотестовим методом. Для цього по чергово до кожного з доступних вузлів кола під'єднують тестові джерела змінного струму заздалегідь відомої частоти, а також до кожного з доступних і частково доступних вузлів по чергово під'єднують тестові пасивні елементи. Це можуть бути резистори, конденсатори або котушки індуктивності з відомими параметрами. Тестування кола проводять по чергово з наступним вимірюванням вузлових потенціалів частково доступних вузлів, а у разі необхідності, і доступних вузлів. За виміряними значеннями вузлових потенціалів шляхом поповнення формується система рівнянь параметричної ідентифікації. Розв'язок цієї системи дозволяє однозначно визначити параметри елементів кола. Запропонований метод вирішує проблему неоднозначності за певних умов тестування. До цих умов належать: вибір тестових вузлів на етапі проектування кола, тобто тестових елементів, значень параметрів тестових елементів, а також особливості топології кола.

1. Алгоритмізація методу параметричної ідентифікації лінійних ARC-кіл

Для опису лінійних ARC-кіл у частотній області використовуємо модифікований метод вузлових потенціалів. Нехай схема складається з $n_X = n_R + n_C + n_L$ елементів і має n_A доступних, n_P частково доступних і n_I внутрішніх вузлів [5]. Зазвичай, в ході параметричної ідентифікації послідовно під'єднують тестові джерела до кожного з n_A доступних вузлів і для кожного тесту вимірюють вузлові потенціали в $n_A + n_P$ доступних і частково доступних вузлах. Загальна кількість Q незалежних вузлових потенціалів для n_A тестів визначається співвідношенням

$$Q = \frac{1}{2} n_A (n_A + 2n_P + 1). \quad (1)$$

Використання тестування для різних частот дозволяє збільшити кількість рівнянь параметричної ідентифікації в частотній області. Необхідна умова існування розв'язку задачі параметричної ідентифікації має вигляд

$$n_X \leq qQ \quad (2)$$

у випадку вимірювання тільки амплітуд і

$$n_X \leq 2qQ \quad (3)$$

у випадку вимірювання амплітуд і фаз вузлових потенціалів. Тут q — кількість частотних точок, у яких проводиться тестування.

У разі існування груп неоднозначності виконується додаткове тестування. Відмінність, порівняно з «класичним», полягає в тому, що до певних доступних і частково доступних вузлів під'єднуються тестові елементи (резистори, конденсатори, котушки індуктивності).

Рівняння параметричної ідентифікації для i -го тесту та частотної точки f_j має вигляд

$$\dot{F}_i(\mathbf{X}, f_j) = \dot{V}_i^{(m)}(f_j) - \dot{V}_i(\mathbf{X}, f_j) = 0, \quad (4)$$

де $i = \overline{1, n_A}, j = \overline{1, q}$; $\dot{V}_i^{(m)}(f_j)$ — компоненти вектора виміряних вузлових потенціалів у доступних і частково доступних вузлах для i -го тесту; $\dot{V}_i(\mathbf{X}, f_j)$ — компоненти вектора вузлових потенціалів, отриманих моделюванням схеми для i -го тесту; \mathbf{X} — вектор параметрів елементів, що діагностуються; крапка над символом означає похідну за часом.

У випадку вимірювання амплітуди та фази дійсна система рівнянь, яка отримується з (4), є така

$$\begin{cases} \operatorname{Re}[\dot{\mathbf{F}}(\mathbf{X}, f_j)] = 0, \\ \operatorname{Im}[\dot{\mathbf{F}}(\mathbf{X}, f_j)] = 0, \quad j = \overline{1, q}. \end{cases} \quad (5)$$

Якщо ж вимірюються тільки амплітуди вузлових потенціалів, то отримаємо таку систему рівнянь параметричної ідентифікації

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, f_j) = \left| \dot{\mathbf{V}}^{(m)}(f_j) \right| - \left| \dot{\mathbf{V}}(\mathbf{X}, f_j) \right|, \quad j = \overline{1, q}. \quad (6)$$

Системи рівнянь (5) і (6) є нелінійні. Розв'язуємо їх із використанням методу Ньютона. Для покращення збіжності модифікуємо метод Ньютона шляхом введення додатного параметра α . Подамо систему нелінійних рівнянь (5) або (6) у вигляді

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}) = 0, \quad (7)$$

Параметр α на k -ій ітерації знаходимо шляхом мінімізації вектора нев'язки

$$\min \mathbf{F}(\mathbf{X}^k - \alpha_k \Delta \mathbf{X}^k), \quad (8)$$

де $\Delta \mathbf{X}^k = \left[d\mathbf{F}(\mathbf{X}^k) / d\mathbf{X} \right]^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{X}^k)$.

2. Приклад параметричної ідентифікації ARC-кола

Дослідимо запропоновану методику параметричної ідентифікації електричних ARC-кіл на прикладі фільтра нижніх частот. Схему даного кола зображено на рисунку. Даний фільтр має три каскади, перші два з яких мають структуру Саллен-Кі, а третій каскад — 2Т-міст із несиметричною характеристикою. Розділення між каскадами в цьому колі реалізовано з допомогою емітерних повторювачів, які утворені двома транзисторами, з'єднаними за схемою Дарлінгтона. Параметричній ідентифікації такого кола повинно передувати вимірювання амплітуд і фаз вузлових потенціалів у доступних і частково доступних вузлах. Для цього прикладу значення вузлових потенціалів у частотній області знаходили шляхом числового розрахунку ARC-схеми.

Нехай у колі вузол 1 — доступний, а вузли — 6, 10, 12, 13, 16, 17 — частково доступні. Це відповідає випадку вимірювання вузлових потенціалів входів і виходів кожного каскаду, а також деяких внутрішніх вузлів. Елементи, що діагностуються — $R_4, R_5, R_7, R_8, R_{11}, R_{12}, R_{13}, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$. Решта елементів кола впливають на режим по постійному струму та повинні діагностуватися на першому етапі параметричної ідентифікації кола по постійному струму.

Емітерні повторювачі кожного з каскадів фільтра замінено малосигнальною моделлю Еберса-Молла, параметри якої визначають із результатів моделювання кола по постійному струму. Деякі особливості такого моделювання розглянуто в роботі [6]. Параметрична ідентифікація здійснюється для малосигнальної схеми даного фільтра.

Результати моделювання справного та несправного кіл наведено в табл. 1, а результати параметричної ідентифікації — у табл. 2. Аналіз результатів, наведених у табл. 2, показує, що похибка визначення параметрів діагностованих елементів кола не перевищує 1,6 % і вона є найбільша для елементів 2Т-моста, що пов'язано з високою чутливістю схеми 2Т-моста.

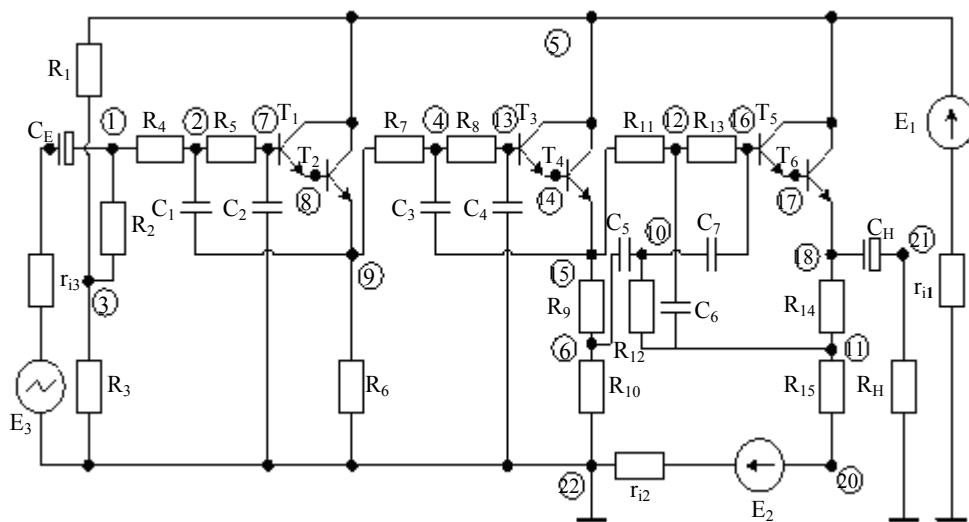


Рис. Принципова схема фільтра нижніх частот

Таблиця 1

Результати моделювання справного та несправного кіл для частоти 60 Гц

Схема		Вузлові напруги у вольтах						
		\dot{V}_1	\dot{V}_6	\dot{V}_{10}	\dot{V}_{12}	\dot{V}_{13}	\dot{V}_{16}	\dot{V}_{17}
Справна	Re \dot{V}	1,8603	1,2247	-0,0617	-0,3449	-0,6067	-0,4609	-0,4978
	Im \dot{V}	-0,0218	-1,2878	-1,6940	-1,8594	-1,5862	-1,7360	-1,8795
Несправна	Re \dot{V}	1,8588	0,8158	-0,9783	-1,3465	-1,2047	-1,3328	-1,4429
	Im \dot{V}	-0,0336	-1,4215	-0,8156	-0,5837	-0,2013	-0,4222	-0,4581

Таблиця 2

Результати параметричної ідентифікації фільтра нижніх частот

Елемент	Номінальні значення	Величина несправності	Результат параметричної ідентифікації	Похибка параметричної ідентифікації (%)
R ₄ (кОм)	350,0	245,0	245,94	0,38
R ₅ (кОм)	350,0	455,0	450,24	1,05
R ₇ (кОм)	350,0	455,0	454,54	0,10
R ₈ (кОм)	350,0	455,0	454,33	0,15
R ₁₁ (кОм)	236,0	306,0	302,72	1,07
R ₁₂ (кОм)	102,0	132,0	130,48	1,15
R ₁₃ (кОм)	236,0	165,0	162,35	1,61
C ₁ (Ф)	$0,560 \cdot 10^{-8}$	$0,728 \cdot 10^{-8}$	$0,7279 \cdot 10^{-8}$	0,01
C ₂ (Ф)	$0,280 \cdot 10^{-8}$	$0,364 \cdot 10^{-8}$	$0,3660 \cdot 10^{-8}$	0,55
C ₃ (Ф)	$0,560 \cdot 10^{-8}$	$0,728 \cdot 10^{-8}$	$0,7293 \cdot 10^{-8}$	0,18
C ₄ (Ф)	$0,280 \cdot 10^{-8}$	$0,364 \cdot 10^{-8}$	$0,3644 \cdot 10^{-8}$	0,11
C ₅ (Ф)	$0,560 \cdot 10^{-8}$	$0,728 \cdot 10^{-8}$	$0,7375 \cdot 10^{-8}$	1,31
C ₆ (Ф)	$0,112 \cdot 10^{-7}$	$0,728 \cdot 10^{-8}$	$0,7876 \cdot 10^{-8}$	0,20
C ₇ (Ф)	$0,560 \cdot 10^{-8}$	$0,728 \cdot 10^{-8}$	$0,7379 \cdot 10^{-8}$	1,36

Нехай тепер у колі вимірюються вузлові потенціали тільки вхідних і вихідних вузлів кожного каскаду. Вузол 1 — доступний, а вузли 5, 10, 17 — частково доступні. Необхідна умова існування розв'язку задачі параметричної ідентифікації виконується для двох частотних точок. Емпірично, виходячи з амплітудно-частотних характеристик справного та несправного кіл, вибрано тестові частоти 60 Гц і 120 Гц. Результати моделювання справного та несправного кіл у цьому випадку подано у табл. 3, а результати параметричної ідентифікації — у табл. 4. Аналіз результатів, наведених у табл. 4, свідчить, що похибка визначення параметрів діагностованих елементів першого та другого каскадів складає не більше 0,35 %.

Для перевірки правильності параметричної ідентифікації третього каскаду проводимо інший тест. Тестове джерело напруги $E_T = 2$ В із тестовим резистором

Таблиця 3

Результати моделювання справного та несправного кіл

Схема	F (Гц)		Вузлові напруги у вольтах			
			\dot{V}_1	\dot{V}_5	\dot{V}_{10}	\dot{V}_{17}
Справна	60	Re \dot{V}	1,8503	1,2348	-0,0617	-0,4978
		Im \dot{V}	-0,0218	-1,2977	-1,6940	-1,8795
Несправна		Re \dot{V}	1,8588	0,8231	-0,9783	-1,4429
		Im \dot{V}	-0,0336	-1,4331	-0,8156	-0,4581
Справна	120	Re \dot{V}	1,8368	-0,1006	-0,8034	-0,0569
		Im \dot{V}	-0,0337	-1,2271	0,1179	1,6085
Несправна		Re \dot{V}	1,8224	-0,3165	-0,1289	0,1526
		Im \dot{V}	-0,0449	-0,8314	0,2320	0,1262

Таблиця 4

Результати параметричної ідентифікації фільтра нижніх частот

Елемент	Номінальні значення	Величина несправності	Результат параметричної ідентифікації	Похибка параметричної ідентифікації (%)
R_4 (кОм)	350,0	245,0	245,17	0,07
R_5 (кОм)	350,0	455,0	454,17	0,18
R_7 (кОм)	350,0	455,0	456,53	0,34
R_8 (кОм)	350,0	455,0	455,85	0,19
R_{11} (кОм)	236,0	306,0	277,98	9,16
R_{12} (кОм)	102,0	132,0	135,88	2,94
R_{13} (кОм)	236,0	165,0	176,24	6,81
C_1 (Ф)	$0,560 \cdot 10^{-8}$	$0,728 \cdot 10^{-8}$	$0,7281 \cdot 10^{-8}$	0,02
C_2 (Ф)	$0,280 \cdot 10^{-8}$	$0,364 \cdot 10^{-8}$	$0,3664 \cdot 10^{-8}$	0,12
C_3 (Ф)	$0,560 \cdot 10^{-8}$	$0,728 \cdot 10^{-8}$	$0,7261 \cdot 10^{-8}$	0,26
C_4 (Ф)	$0,280 \cdot 10^{-8}$	$0,364 \cdot 10^{-8}$	$0,3631 \cdot 10^{-8}$	0,26
C_5 (Ф)	$0,560 \cdot 10^{-8}$	$0,728 \cdot 10^{-8}$	$0,7053 \cdot 10^{-8}$	3,11
C_6 (Ф)	$0,112 \cdot 10^{-7}$	$0,786 \cdot 10^{-8}$	$0,8067 \cdot 10^{-8}$	2,63
C_7 (Ф)	$0,560 \cdot 10^{-8}$	$0,728 \cdot 10^{-8}$	$0,7760 \cdot 10^{-8}$	6,59

$R_T = 60$ Ом під'єднуємо до 10-го вузла та проводимо вимірювання вузлових потенціалів у 12-ому та 17-ому вузлах. Результати моделювання цього кола подано у табл. 5, а результати параметричної ідентифікації третього каскаду фільтра нижніх частот — у табл. 6. Бачимо, що похибка визначення параметрів діагностованих елементів складає не більше 2,0 %.

Таблиця 5

Результати моделювання справного та несправного кіл

Схема	F (Гц)		Вузлові напруги у вольтах		
			\dot{V}_{10}	\dot{V}_{12}	\dot{V}_{17}
Справна	60	Re \dot{V}	1,5372	1,7017	1,7279
		Im \dot{V}	0,0188	-0,2307	-0,3693
Несправна		Re \dot{V}	1,5372	1,7057	1,7004
		Im \dot{V}	0,0188	-0,4783	-0,6696
Справна	120	Re \dot{V}	1,4765	1,1130	0,2419
		Im \dot{V}	-0,1269	-2,4419	-2,9262
Несправна		Re \dot{V}	1,4763	0,5569	0,1074
		Im \dot{V}	-0,1264	-1,0621	-1,1010

Таблиця 6

Результати параметричної ідентифікації третього каскаду фільтра

Елемент	Номинальні значення	Величина несправності	Результат параметричної ідентифікації	Похибка параметричної ідентифікації (%)
R ₁₁ (кОм)	236,0	306,0	302,26	1,22
R ₁₂ (кОм)	102,0	132,0	130,50	1,11
R ₁₃ (кОм)	236,0	165,0	163,13	1,13
C ₅ (Ф)	$0,560 \cdot 10^{-8}$	$0,728 \cdot 10^{-8}$	$0,7434 \cdot 10^{-8}$	1,97
C ₆ (Ф)	$0,112 \cdot 10^{-7}$	$0,786 \cdot 10^{-8}$	$0,7955 \cdot 10^{-8}$	1,20
C ₇ (Ф)	$0,560 \cdot 10^{-8}$	$0,728 \cdot 10^{-8}$	$0,7317 \cdot 10^{-8}$	0,50

Висновки. Основні особливості параметричної ідентифікації ARC-кіл у частотній області полягають у виборі методу вимірювання амплітуд і фаз вузлових потенціалів і вимірювальних приладів, наявності груп неоднозначності в колі, визначенні кількості параметрів елементів кола, які можуть бути діагностовані за обмеженої кількості доступних і частково доступних вузлів, а також у виборі методу формування та розв'язування систем рівнянь параметричної ідентифікації. Запропонований підхід на прикладі параметричної ідентифікації ARC-фільтра нижніх частот показав ефективність вибору методу вимірювання амплітуд і фаз вузлових потенціалів для усунення проблем неоднозначності параметричної ідентифікації у разі під'єднання тестових елементів (резисторів, конденсаторів, котушок індуктивностей) до доступних і частково доступних вузлів.

Література

- [1] Бэндлер, Дж. Диагностика неисправностей в аналоговых цепях / Дж. Бэндлер, А. Э. Салама // ТИИЭР. — 1985. — Т. 73, № 8. — С. 35-104.
- [2] Блажитко, Б. Я. Влияние погрешности измерения узловых потенциалов на результаты диагностики электрических цепей / Б. Я. Блажитко // Теоретическая электротехника. — 1990. — Вып. 48. — С. 101-108.
- [3] Automated Selection of Test Frequencies for Fault Diagnosis in Analog Electronic Circuits / C. Alippi, M. Catelani, A. Fort, M. Mugnaini // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2005. — Vol. 54, No 3. — P. 1033-1044.
- [4] Блажитко, Б. Я. Проблема неоднозначности у разі діагностики електричних кіл / Б. Я. Блажитко, В. Г. Рабик // Теоретична електротехніка. — 2000. — Вип. 55. — С. 20-24.
- [5] Блажитко, Б. Я. Основы теории диагностики аналоговых электронных цепей по постоянному току / Б. Я. Блажитко, В. Г. Рабик // Теоретическая электротехника. — 1988. — Вып. 44. — С. 121-129.
- [6] Блажитко, Б. Я. Учет зависимости коэффициента передачи тока биполярных транзисторов в модели цепи / Б. Я. Блажитко, И. М. Заячук // Теоретическая электротехника. — 1984. — Вып. 36. — С. 99-104.

Peculiarities of the ARC-circuits frequency domain diagnostics

Bohdan Blagitko, Igor Zayachuk, Vasyl Rabyk, Lyubomyra Kit

Peculiarities of the ARC-circuits frequency domain diagnostics using the results of nodal potentials measurements are discussed. In order to overcome the problem of ambiguity groups the accessible and partly accessible nodes testing is suggested. The proposed algorithm allows us to eliminate the influence of ambiguity groups of elements and to define unambiguously the parameters of elements using measured nodal potentials. This is achieved by connecting the passive test elements at each stage of testing. Diagnostics of low-frequency ARC filter in amplitude/phase measurement mode is described.

Особенности параметрической идентификации ARC-цепей в частотной области

Богдан Блажитко, Игор Заячук, Василий Рабик, Любомира Кит

В статье рассмотрены особенности параметрической идентификации ARC-цепей в частотной области по результатам измерения узловых потенциалов. Для решения проблемы неоднозначных групп предложено использовать тестирование в доступных и частично доступных узлах цепи. Предложенный алгоритм за счет подсоединения на каждом этапе тестирования пассивных тестовых элементов позволяет исключить влияние неоднозначных групп элементов и однозначно определить параметры элементов по измеренным узловым потенциалам. Приведены методика и результаты параметрической идентификации ARC-фильтра нижних частот при измерении амплитуд и фаз узловых потенциалов.

Представлено професором В. Чекуріним

Отримано 28.04.09