

УДК 621.372.061

ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ КАСКАДНОЇ СТРУКТУРИ

Б. Благітко, В. Рабик

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

Запропоновано методологію та алгоритм діагностики електронних кіл каскадної структури в частотній області методами параметричної ідентифікації. Перед діагностикою виконано перевірку тестопридатності кожного з каскадів кола. Завдяки приєднанню на кожному етапі діагностики тестових джерел та елементів до входів та виходів каскадів схеми запропонований алгоритм дає змогу однозначно визначати параметри елементів за вимірними вузловими потенціалами. Цей підхід проілюстровано на прикладі діагностики трикаскадного режекторного фільтра.

Ключові слова: діагностика, параметрична ідентифікація, електронні кола каскадної структури, ранг матриці чутливості, вузлові потенціали.

За обмеженої кількості вимірювань в електричних колах параметри елементів кола можна визначити методами параметричної ідентифікації [1]. Кількість елементів, які можуть бути діагностовані в електричному колі, залежить від тестопридатності кола.

У праці [3] з'ясовано, що тестопридатність кола визначена рангом матриці чутливості. Зокрема, якщо передаточна функція електронного кола є раціональною функцією щодо параметрів X , то ранг по стовпцях матриці чутливості є сталим.

Подібна процедура знаходження ступеня тестопридатності кола запропонована в [1]. Ступінь тестопридатності визначено як

$$\mu = n_x - \rho, \quad (1)$$

де n_x – кількість параметрів елементів кола, ρ – ранг матриці чутливості вузлових потенціалів, залежної від параметрів елементів X і комплексної величини s . Якщо $\mu = 0$, то всі параметри елементів кола можуть бути визначені. В іншому випадку ідентифікація всіх параметрів елементів кола неможлива.

Ми пропонуємо модифікацію багатотестового методу діагностики, розглянутого в [2], для діагностики електронних кіл каскадної структури в частотній області. Перед діагностуванням електронних кіл визначено ступінь тестопридатності кожного з каскадів кола шляхом визначення рангу по стовпцях матриці чутливості вузлових потенціалів [1,2].

У запропонованому методі почергово до входу кожного з каскадів кола приєднують тестові джерела з тестовими елементами. Цей метод дає змогу методами параметричної ідентифікації діагностувати електронні кола в разі виконанні певних умов тестування. До цих умов передусім належить вибір тестових вузлів, який повинен відбуватися на етапі проектування кола, типу тестових елементів, значення параметрів тестових елементів, а також особливості топології схеми.

Опишемо алгоритм багатотестової діагностики в частотній області та детально розглянемо числовий експеримент діагностики трикаскадного режекторного фільтра.

Суть запропонованого підходу з'ясуємо на простому прикладі (рис. 1). Схема, зображена на рис. 1, – це активний RC-фільтр нижніх частот, який складається з пасивної RC-ланки та з'єднаного з нею операційного підсилювача. Завдяки малому вихідному опору операційний підсилювач забезпечує необхідну ізоляцію між каскадами в разі синтезу схем каскадної структури.

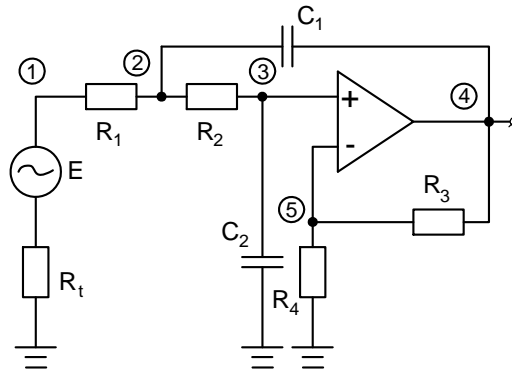


Рис. 1. Схема однокаскадного RC-фільтра другого порядку.

Дослідження кожного з каскадів схеми на тестопридатність дає змогу зробити висновок про діагностованість цілої схеми. Для кіл каскадної структури вважатимемо доступними і частково доступними вузлами тільки вхідний та вихідний вузли кожного з каскадів. Для заданої схеми вузол 1 доступний, а вузол 4 частково доступний. Діагностика схеми полягає в визначенні $n_x = 5$ параметрів елементів R_1, R_2, C_1, C_2, K ($K = 1 + R_4 / R_3$).

Перед діагностуванням кола необхідно перевірити цю схему на тестопридатність, що полягає в визначенні рангу по стовпцях матриці чутливості вузлових потенціалів [2]. Вирази для вузлових потенціалів \dot{V}_1 та \dot{V}_4 для заданої схеми такі:

$$\dot{V}_1 = E_t \frac{1 + s^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + s(C_1 R_1 (1 - K) + C_2 (R_1 + R_2))}{1 + s^2 C_1 C_2 (R_1 R_2 + R_t R_2) + s(C_1 (R_1 + R_t) (1 - K) + C_2 (R_1 + R_2 + R_t))},$$

$$\dot{V}_4 = E_t \frac{K}{1 + s^2 C_1 C_2 (R_1 R_2 + R_t R_2) + s(C_1 (R_1 + R_t) (1 - K) + C_2 (R_1 + R_2 + R_t))}.$$

Оскільки параметри не впливають на визначення тестопридатності схеми [3], то задамо значення $X = (R_1, R_2, C_1, C_2, K) = (1, 1, 1, 1, 2)$. Вирази для похідних вузлових потенціалів по елементах кола наведено в табл. 1.

Таблиця 1
Аналітичні вирази похідних вузлових потенціалів \dot{V}_1 та \dot{V}_4

	$-\frac{\partial \dot{V}_1}{\partial X}$	$-\frac{\partial \dot{V}_2}{\partial X}$
$X = R_1$	$-\frac{s^4}{(2s^2 + s + 1)^2}$	$\frac{s^2}{(2s^2 + s + 1)^2}$
$X = R_2$	$\frac{s^2}{(2s^2 + s + 1)^2}$	$\frac{s(2s + 1)}{(2s^2 + s + 1)^2}$
$X = C_1$	$-\frac{(s-1)^2(s+1)}{(2s^2 + s + 1)^2}$	$\frac{2s(s-1)}{(2s^2 + s + 1)^2}$
$X = C_2$	$\frac{s(2s+1)}{(2s^2 + s + 1)^2}$	$\frac{s(2s+3)}{(2s^2 + s + 1)^2}$
$X = K$	$-\frac{s(s+1)}{(2s^2 + s + 1)^2}$	$-\frac{2s}{(2s^2 + s + 1)^2}$

З рядків табл. 1, бачимо, що вони лінійно незалежні або ранг матриці чутливості вузлових потенціалів $n_x = 5$. Для цієї схеми $\mu = 0$ і всі параметри елементів кола (R_1, R_2, C_1, C_2, K) можуть бути визначені однозначно.

Алгоритмізація методу. Для машинної реалізації задачі діагностики пропонуємо виконувати тестування за допомогою тестових елементів та джерел у доступних і частково доступних вузлах, збільшуючи ранг матриці Якобі додатковими частотними точками в разі ідентифікації в частотній області.

Нехай електронна схема складається з n_x елементів та має n_a доступних, n_p частково доступних та n_i внутрішніх вузлів ($n = n_a + n_p + n_i$) [2]. Під час діагностування каскадних структур послідовно приєднують тестові джерела до кожного з n_a доступних вузлів (входи каскадів, що утворюють електричну схему).

Загальна кількість незалежних рівнянь діагностики для n_a тестів визначена виразом [2]

$$Q = n_a \cdot (n_a + 2n_p + 1) / 2. \quad (2)$$

Необхідна умова існування розв'язку задачі параметричної ідентифікації в частотній області має вигляд [2]

$$n_x \leq 2Q \cdot q \quad (3)$$

у разі вимірювання амплітуди і фази вузлових потенціалів та

$$n_x \leq Q \cdot q \quad (4)$$

у разі вимірювання тільки амплітуд вузлових потенціалів; q – кількість частотних точок.

У разі існування груп неоднозначності виконують додаткове тестування, яке полягає в приєднанні до певних доступних і частково доступних вузлів тестових елементів (резисторів, конденсаторів, котушок індуктивності).

Для багаточастотної і багатотестової діагностики рівняння діагностики мають вигляд [2]

$$F(x, f_i) = \dot{V}_m - \dot{V}(x, f_i) = 0, \quad i = 1, \dots, q. \quad (5)$$

Оскільки вектор невідомих X – це дійсні величини, а (5) – система комплексних рівнянь, то для визначення вектора невідомих необхідно звести систему комплексних рівнянь до дійсної. Отриману систему рівнянь розв'язують з використанням методу Ньютона. На кожній з ітерацій Ньютона отримуємо нові значення параметрів елементів кола. Тому на кожній ітерації методу Ньютона відбувається моделювання в частотній області схеми з використанням поточного значення параметрів елементів.

Нелінійності в рівняннях (5) мають вигляд співвідношення виразів, кожний з яких є сумою добутків елементів вектора X . Як початкове наближення X^0 вибирають номінальні значення параметрів елементів.

Для більшості електронних кіл матриця Якобі рівнянь діагностування погано зумовлена. Для розв'язування таких систем лінійних рівнянь на кожній ітерації методу Ньютона використовують метод параметричної регуляризації [2]. В цьому випадку розв'язування систем лінійних рівнянь зводиться до мінімізації функціонала

$$M^\alpha(x^\alpha, b) = |A \cdot x - b|^2 + \alpha \cdot |x|^2, \quad \alpha > 0 \quad (6)$$

за параметром α , який визначають за відхилом.

Приклад діагностування електронного кола каскадної структури. Діагностування електронних кіл каскадної структури розглянуто на прикладі режекторного фільтра, принципова схема якого зображена на рис. 2. Фільтр складається з трьох каскадів, кожний з яких – це 2Т-міст. Діагностують параметри таких елементів: $R_1, R_2, R_3, R_6, R_7, R_8, R_{12}, R_{13}, R_{14}, R_{15}, R_{16}, C_1, C_2, C_3, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}$, які є елементами 2Т-моста кожного з каскадів, і дільник R_{15}, R_{16} . Доступними та частково доступними вузлами є вхідні та вихідні вузли кожного з каскадів. Зокрема, вузол 1 доступний, а вузли 5, 10, 12, 15 частково доступні. До вузла 1 приєднане тестове джерело напруги $E_T = 5$ В з тестовим резистором $R_T = 6,0$ кОм. З виразів (2), (3) отримаємо $n_A = 1, n_p = 4, n_I = 12, n_X = 20, Q = 5$. Замість вимірювання амплітуд і фаз вузлових потенціалів у доступних і частково доступних вузлах виконували моделювання схеми за допомогою програми моделювання. Кількість рівнянь діагностики, які отримують для однієї частотної точки, $Q_1 = 2Q = 10$. Для визначення $n_X = 20$ параметрів елементів, які діагностують, необхідно дві частотні точки. Вибір частотних точок виконували емпірично, використовуючи амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) справного та несправного кіл (рис. 3). Ці частоти (30 Гц, 70 Гц) розміщені по обидва боки від частоти режекції 50 Гц.

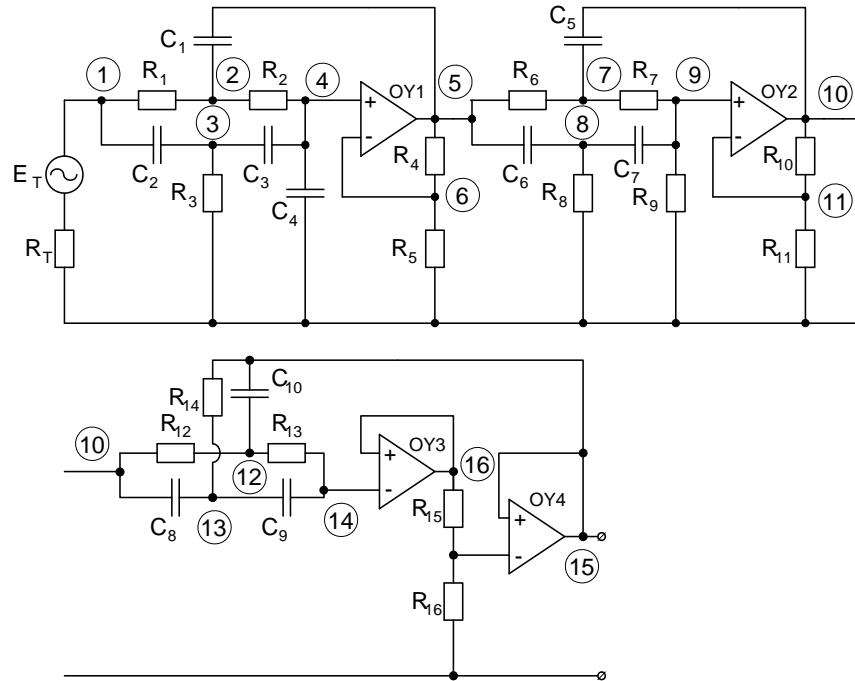


Рис. 2. Принципова схема трикаскадного режекторного фільтра.

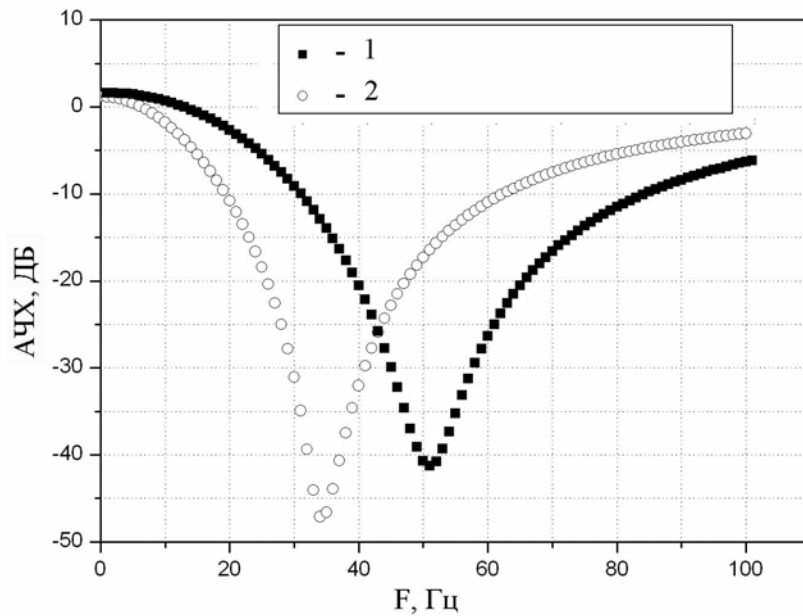


Рис.3. АЧХ справного (1) та несправного (2) кіл

Результати моделювання справного та несправного кіл для цих частот наведені в табл. 2, результати діагностування цього кола табл. 3.

Таблиця 2

Результати моделювання справного та несправного кіл у разі приєднання тестового джерела до входу першого каскаду

F , Гц		\dot{V}_1 , В	\dot{V}_5 , В	\dot{V}_{10} , В	\dot{V}_{12} , В	\dot{V}_{15} , В	Примітка
30	Re	1,487	-0,212	-0,587	-0,550	-0,573	Справне коло
	Im	-1,306	-1,095	-0,215	-0,116	-0,885	
	Re	1,206	-0,235	-0,067	-0,039	-0,035	Несправне коло
	Im	-0,979	-0,113	0,008	0,013	0,025	
70	Re	1,158	0,366	-0,076	-0,116	-0,114	Справне коло
	Im	-0,552	0,343	0,182	0,162	0,136	
	Re	0,961	0,538	0,142	0,096	0,075	Несправне коло
	Im	-0,527	0,327	0,472	0,485	0,453	

Таблиця 3

Результати діагностування кола в разі приєднання тестового джерела до входу першого каскаду

Елемент	Номінальне значення	Значення несправності	Діагностоване значення	δ , %
R_1 , кОм	3,183	3,683	3,6831	0,003
R_2 , кОм	3,183	3,683	3,6829	0,003
R_3 , кОм	1,591	1,091	1,0911	0,01
R_6 , кОм	3,183	2,883	3,6103	25,2
R_7 , кОм	3,183	2,883	3,2665	13,3
R_8 , кОм	1,591	1,991	2,2359	12,3
R_{12} , кОм	3,183	3,583	3,8388	7,1
R_{13} , кОм	3,183	3,583	3,6978	3,2
R_{14} , кОм	1,591	1,991	2,0115	1,03
R_{15} , кОм	0,52	0,52	0,5187	0,24
R_{16} , кОм	9,48	9,48	9,5026	0,24
C_1 , мкФ	2,0	2,5	2,5001	0,004
C_2 , мкФ	1,0	1,5	1,5001	0,007
C_3 , мкФ	1,0	1,5	1,5001	0,007
C_5 , мкФ	2,0	2,5	2,0289	18,8
C_6 , мкФ	1,0	1,5	1,3352	10,98
C_7 , мкФ	1,0	1,5	1,2477	16,8
C_8 , мкФ	1,0	1,3	1,2715	2,2
C_9 , мкФ	1,0	1,3	1,2489	3,9
C_{10} , мкФ	2,0	2,4	2,2400	6,6

З табл. 3 випливає, що точність діагностики елементів першого каскаду висока, тоді як елементи другого та третього каскадів визначені з набагато більшою похибкою (до 25%). Зазначимо, що АЧХ несправного кола і АЧХ кола з параметрами елементів, отриманими під час діагностування, практично збігаються. Це означає, що діагностика каскадних кіл у разі вимірювання тільки потенціалів у вузлах вхід-вихід для кожного каскаду і з використанням тільки одного тестового джерела напруги для різних частот може мати безліч розв'язків. Пояснення цього полягає в тому, що елементи першого каскаду фільтра впливають на вузлові потенціали наступних каскадів, тоді, як унаслідок розділення кожного з каскадів за допомогою операційних підсилювачів впливом наступних каскадів фільтра на попередні можна нехтувати.

Для отримання однозначності в разі діагностування кіл з каскадною структурою пропонуємо виконувати тестування приєднанням тестового джерела напруги до входу кожного з каскадів. Другий тест полягає в приєднанні тестового джерела напруги $E_T = 5 \text{ В}$ з тестовим резистором $R_T = 100,0 \text{ Ом}$ до вузла 5. В цьому випадку $n_A = 1$, $n_P = 3$, $n_I = 13$, $n_X = 14$. Необхідна умова діагностованості цього кола виконується для двох частотних точок. Як і для першого тесту, вибираємо частоти 30 Гц і 70 Гц. Для цього і наступних тестів справним колом вважають коло, в якому всі параметри діагностованих елементів попередніх каскадів замінені значеннями, які отримані внаслідок діагностування. Цим знімається вплив несправностей елементів попередніх каскадів на наступні. Для вилучення впливу на результат моделювання елементів попереднього (першого) каскаду у разі приєднання тестового джерела до другого каскаду необхідно зменшити опір $R_{\text{вх}}$ у схемі заміщення операційного підсилювача до 0.2 ... 2.0 Ом. Цим відключають перший каскад. У разі реального вимірювання напруг необхідно закортити вхід попереднього каскаду. Результати моделювання справного і несправного кіл представлені в табл. 4. З табл. 4 випливає, що відмінність між значеннями потенціалів V_5 для справного та несправного кіл незначна.

Таблиця 4

Результати моделювання справного та несправного кіл в разі приєднання тестового джерела до входу другого каскаду

$F, \text{ Гц}$		$V_5, \text{ В}$	$V_{10}, \text{ В}$	$V_{12}, \text{ В}$	$V_{15}, \text{ В}$	Примітка
30	Re	2,8710	0,8251	0,5566	0,4977	Справне коло
	Im	-0,0114	-1,3810	-1,3356	-1,4069	
	Re	2,8618	0,6194	0,3239	0,2236	Несправне коло
	Im	-0,0108	-0,3981	-0,3178	-0,4193	
70	Re	2,8610	0,4004	0,1531	0,0523	Справне коло
	Im	-0,0168	1,0479	1,1232	1,0112	
	Re	2,8450	1,6586	1,5133	1,3549	Несправне коло
	Im	-0,0038	1,4895	1,6452	1,5727	

Результати діагностування для цього випадку наведені в табл. 5. Похибка визначення параметрів діагностованих елементів другого каскаду не перевищує 0,1%.

Таблиця 5

Результати діагностування заданого кола в разі приєднання тестового джерела до входу другого каскаду

Елемент	Номінальне значення	Значення несправності	Діагностоване значення	$\delta, \%$
$R_6, \text{кОм}$	3,183	2,883	2,8811	0,07
$R_7, \text{кОм}$	3,183	2,883	2,8845	0,06
$R_8, \text{кОм}$	1,591	1,991	1,9916	0,03
$R_{12}, \text{кОм}$	3,183	3,583	3,7001	3,27
$R_{13}, \text{кОм}$	3,183	3,583	3,7679	5,22
$R_{14}, \text{кОм}$	1,591	1,991	2,0732	4,13
$R_{15}, \text{кОм}$	0,52	0,52	0,5210	0,19
$R_{16}, \text{кОм}$	9,48	9,48	9,4623	0,18
$C_5, \text{мкФ}$	2,0	2,5	2,5007	0,03
$C_6, \text{мкФ}$	1,0	1,5	1,4996	0,03
$C_7, \text{мкФ}$	1,0	1,5	1,5002	0,01
$C_8, \text{мкФ}$	1,0	1,3	1,2482	3,98
$C_9, \text{мкФ}$	1,0	1,3	1,2476	4,03
$C_{10}, \text{мкФ}$	2,0	2,4	2,3030	4,04

Для діагностування елементів третього каскаду тестове джерело E_T приєднують до входу третього каскаду (вузол 10). Значення тестового джерела напруги $E_T = 5 \text{ В}$, а значення тестового резистору $R_T = 100,0 \text{ Ом}$. Результати моделювання справного та несправного кіл наведені в табл. 6.

Таблиця 6

Результати моделювання справного та несправного кіл у разі приєднання тестового джерела до входу третього каскаду

$F, \text{Гц}$		$V_{10}, \text{В}$	$V_{12}, \text{В}$	$V_{15}, \text{В}$	Примітка
30	Re	2,8762	2,5555	2,6089	Справне коло
	Im	-0,0387	-0,4051	-0,5616	
	Re	2,8703	1,7256	1,6010	Несправне коло
	Im	-0,0508	-0,3904	-0,9323	
70	Re	2,8425	2,7911	2,4430	Справне коло
	Im	0,0252	0,6781	0,7888	коло
	Re	2,8498	2,8425	2,6292	Несправне коло

З табл. 6 видно, що потенціал V_{10} не можна враховувати в разі формування рівнянь діагностики, оскільки відмінність між потенціалом справного та несправного кіл у цьому вузлі незначна. Для виконання необхідної умови задачі діагностики достатньо дві частотні точки. Результати діагностування третього

каскаду наведені в табл. 7. Похибка діагностування елементів третього каскаду не перевищує 1,5%.

Таблиця 6

Результати діагностування заданого кола в разі приєднання тестового джерела до входу третього каскаду

Елемент	Номінальне значення	Значення несправності	Діагностоване значення	$\delta, \%$
$R_{12}, \text{кОм}$	3,183	3,583	3,6123	0,82
$R_{13}, \text{кОм}$	3,183	3,583	3,6248	1,16
$R_{14}, \text{кОм}$	1,591	1,991	2,0110	1,01
$R_{15}, \text{кОм}$	0,52	0,52	0,5199	0,015
$R_{16}, \text{кОм}$	9,48	9,48	9,4697	0,11
$C_8, \text{мкФ}$	1,0	1,3	1,2870	1,00
$C_9, \text{мкФ}$	1,0	1,3	1,2870	1,00
$C_{10}, \text{мкФ}$	2,0	2,4	2,3766	0,98

Унаслідок розділення кожного з каскадів операційними підсилювачами у разі подачі напруги на вхід k -го каскаду достатньо діагностувати тільки елементи цього каскаду. Це приводить до того, що під час діагностування зменшується розмір системи рівнянь, а точність діагностики залежить від розділення каскадів.

1. Бендлер Дж. У., Салама А.Э. Диагностика неисправностей в аналоговых цепях // ТИИЭР. 1985. Т. 73. N 8 – С. 35-87.
2. Благітко Б.Я., Рабик В.Г. Методы диагностики аналоговых цепей в частотной области // Теор. электротехника. 1987. Вып. 52. N 8 – С. 45-55.
3. Sen N., Saeks R., Fault diagnosis for linear systems via multifrequency measurement // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 1979 V. 26. N7 – P. 457-465.

DIAGNOSTICS OF ELECTRONICS CIRCUITS WITH CASCADE STRUCTURE

B. Blagitko, V. Rabyk.

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

It was proposed the methodology and algorithm of diagnostics of electronic cascade-structure circuits in frequency domain by the methods of parametric identification. Testability of each of the circuit's cascades is tested before diagnostics. Postulated algorithm allows to determine precisely the parameters of elements via the measured node potentials by the connection at each stage of diagnostics of test sources and elements to the input and output of the circuit's cascades. This approach is illustrated by the example of diagnostics of the three-cascade rejector filter.

Key words: diagnostics, parametric identification, electronics circuits with cascade structure, rank of the sensitivity matrix, node potentials.

Стаття надійшла до редколегії 27.12.2006

