

Politechnika Śląska  
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki  
Instytut Elektroniki

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**Testowanie elektronicznych układów  
analogowych z wykorzystaniem  
wielowymiarowej przestrzeni  
poszukiwań i algorytmów zbiorowej  
inteligencji**

**mgr inż. Piotr Kyziół**

Promotor: prof. dr hab. inż. Jerzy Rutkowski

Gliwice, 2011

## Spis treści

1	Wstęp.....	1
1.1	Motywacja, cel i tezy pracy .....	1
2	Testowanie i diagnostyka AUE.....	3
2.1.1	Klasyfikacja uszkodzeń .....	3
2.2	Słownikowe metody testowania .....	4
2.2.1	Informacja diagnostyczna w słownikowych metodach testowania .....	4
3	Czwórnikowa metoda testowania analogowych układów elektronicznych.....	7
3.1	Ogólny opis metody 4-tBT .....	7
3.1.1	Dobór struktury czwórnika testującego .....	8
3.1.2	Dobór wartości elementów czwórnika testującego.....	9
3.1.3	Tester AUE dla metody 4-tBT .....	9
3.2	Etapy metody 4-tBT.....	10
3.2.1	Pierwszy etap metody 4-tBT.....	11
3.2.2	Drugi etap metody 4-tBT .....	13
3.2.3	Trzeci etap metody 4-tBT .....	15
3.2.4	Czwarty etap metody 4-tBT.....	18
4	Wybrane przykłady obliczeniowe.....	21
5	Podsumowanie i wnioski .....	23
	Bibliografia .....	26

# 1 Wstęp

Jednym z podstawowych problemów występujących podczas produkcji i eksploatacji analogowych i mieszanych sygnałowo układów elektronicznych jest problem ich automatycznego testowania. Dotyczy on wszystkich etapów produkcji układu elektronicznego – począwszy od pojedynczych elementów a skończywszy na kompletnym systemie. Zgodnie z definicją [Huer93], testowaniem nazywany jest proces, w którym dokonywana jest weryfikacja tego czy układ spełnia wymagania projektowe.

Badania z obszaru testowania i diagnostyki Analogowych Układów Elektronicznych (AUE) mają dwa główne cele. Pierwszym z nich, nadrzędnym i najważniejszym jest poprawa skuteczności diagnostycznej, drugim jest zmniejszenie nakładów sprzętowych. Poprawa testowania i diagnostyki związana jest przede wszystkim z zwiększeniem informacji diagnostycznej, która może być pozyskana z Układu Testowanego (UT) na drodze pomiarowej. Wymieniony wyżej obszar badań, tj. zwiększenie sterowalności oraz obserwowalności testowanego układu, ma bezpośredni wpływ na informacje diagnostyczną. Wysokie koszty aparatury testującej i długi czas testowania może znacząco zwiększyć ostateczny koszt wyprodukowanego układu. Zmniejszenie kosztów testowania AUE, odbywa się poprzez optymalizację doboru punktów testowych (minimalizującą całkowity czas testowania) oraz przez rozwój i standaryzację architektury sprzętu ułatwiającego testowanie [Rut03], [Tocz09].

## 1.1 Motywacja, cel i tezy pracy

Układy elektroniczne z roku na rok stają się coraz bardziej złożone, co skutkuje produkowaniem ich w formie scalonej (ang. Integrated Circuits - IC). Taki stan rzeczy wynika przede wszystkim z zapotrzebowania rynkowego na coraz bardziej uniwersalne, wielozadaniowe, o mniejszym poborze mocy, a co za tym idzie tańsze rozwiązania. Można sformułować następujący cel i główną tezę pracy:

Celem pracy jest:

**Opracowanie metody testowania analogowych układów elektronicznych z ograniczonym dostępem pomiarowym, która wykorzystuje wielowymiarową przestrzeń poszukiwań.**

Mając na uwadze powyższy cel pracy, można postawić następującą tezę główną:

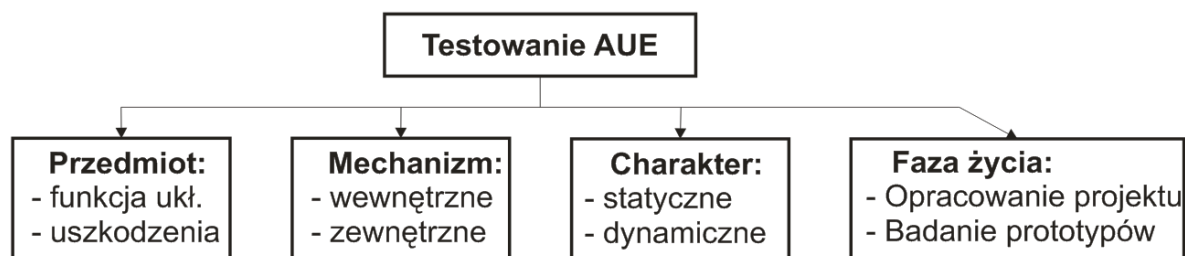
**Użycie wielowymiarowej przestrzeni poszukiwań zwiększa liczbę dostępnych pomiarowo węzłów testowych oraz poprawia skuteczność diagnostyki analogowych układów elektronicznych.**

Ponadto zaproponowano trzy tezy cząstkowe:

- Wykorzystanie heurystycznych algorytmów zbiorowej inteligencji umożliwia wyszukanie informacji diagnostycznej w wielowymiarowej przestrzeni poszukiwań.
- Wykorzystanie dedykowanej metody optymalizacji doboru punktów testowych pozwala na wyszukanie minimalnego zbioru punktów testowych.
- Zastosowanie syntezy impedancji dwójnika RLC do wyznaczania wartości elementów struktury dołączonej do testowanego układu, przyspiesza proces fizycznego testowania układu na linii produkcyjnej.

## 2 Testowanie i diagnostyka AUE

Na przestrzeni lat powstało wiele różnych metod testowania, np. [Arabi95], [Chatt01], [Golo07a], [Rut02], [Tad02]. Metody te można podzielić, między innymi, ze względu na: przedmiot testu, mechanizm testowania, charakter testowania oraz fazę życia (rys. 2-1) [Huer93].



Rys. 2-1 Kryteria systematyki metod testowania [Rut03].

Nadrzędnym kryterium podziału metod testowania jest przedmiotu testu. Może nim być specyfikacja układu (testowanie funkcjonalne, testowanie specyfikacji) lub też uszkodzenia układu (**podrozdział 2.1.1**). Testowanie funkcjonalne (ang. Specification Driven Test - SDT) polega na sprawdzeniu wybranych (przez doświadczonego inżyniera) specyfikacji testowanego układu. Wadą testowania SDT jest to, że nie może uwzględniać wszystkich możliwych warunków pracy układu, ponieważ zbiór testów musiałby być nieskończony [Tocz09], [Rut03].

Alternatywą dla testowania funkcjonalnego jest testowanie uszkodzeń (ang. Fault Driven Test - FDT). Metody testowania wykorzystujące podejście FDT wymagają wytypowania (przez doświadczonego inżyniera projektanta) zbioru uszkodzeń elementów układu elektronicznego (stanów testowanego układu), a następnie wielokrotnych symulacji komputerowych tego układu. Dla tego typu testowania przyjmuje się, że układ jest uszkodzony jeżeli przynajmniej jeden element jest uszkodzony, tj. wartość jego parametru wykracza poza przedział tolerancji [Rut03].

### 2.1.1 Klasyfikacja uszkodzeń

Dla układu testowanego uszkodzenie to defekt fizyczny elementu tego układu. Jego wartość określa uchyb, czyli odchyłka parametru obwodu (np. rezystancji, indukcyjności czy pojemności) od wartości nominalnej, większa od dopuszczalnej tolerancjami projektowymi [Rut03]. Aby w pełni opisać uszkodzenie należy podać jego wszystkie atrybuty, tj.: krotność, źródło, zakres, naturę (wpływ na topologię układu), wartość i czas trwania.

Można wyróżnić trzy poziomy testowania i diagnostyki układu lub urządzenia elektronicznego [Rut03]:

- a) detekcja uszkodzenia – wykrycie tego czy układ jest nieuszkodzony, czyli czy spełnia założone specyfikacje projektowe,

- b) lokalizacja uszkodzenia – wskazanie elementu powodujących, że nie spełnione są specyfikacje projektowe,
- c) identyfikacja uszkodzenia – określenie wielkości uszkodzenia.

W zależności od fazy życia układu oraz potrzeb, wybierany jest dany poziom testowania i diagnostyki. Najważniejszym z przedstawionych poziomów jest poziom detekcji uszkodzenia. Po stwierdzeniu uszkodzenia w testowanym układzie można w razie potrzeby określić, który element jest uszkodzony (lokalizacja) i jaka jest wielkość uszkodzenia (identyfikacja).

## 2.2 Słownikowe metody testowania

Przyjmując, że podstawowym kryterium wyboru metody testowania jest przedmiot testu, stwierdzić należy, że szersze zastosowanie znalazły techniki, które stosują testy uszkodzeń elementów, tzn. testowanie uszkodzeń FDT, głównie z racji niższych kosztów testowania aniżeli w przypadku testów SDT [Rut03]. Testowanie FDT wymaga przeprowadzenia symulacji komputerowych testowanego układu, tj. układu nieuszkodzonego i układów uszkodzonych. Symulację komputerową można wykonać przed dokonaniem pomiarów, czyli na etapie przedtestowym (SBT), albo po ich wykonaniu czyli na etapie potestowym (SAT).

W metodach SAT, najpierw dokonywane są pomiary testowanego układu a następnie przeprowadzana jest jego symulacja komputerowa. Na podstawie: zmierzonych wartości sygnałów pochodzących z testowanego układu, modelu UT oraz danych otrzymanych w wyniku symulacji, można wykryć i zlokalizować uszkodzenie [Rut03]. W metodach SBT, najpierw przeprowadzana jest symulacja komputerowa testowanego układu. Na podstawie danych otrzymanych z symulacji tworzony jest tzw. słownik uszkodzeń [Rut03]. Następnie, na etapie testowania dokonywane są pomiary testowanego układu, których wyniki są porównywane ze słownikiem. W ten sposób uzyskać można odpowiedź na pytanie, czy w układzie jest uszkodzenie i ewentualnie jeżeli układ jest uszkodzony pozwala stwierdzić, który element jest uszkodzony. Techniki SBT charakteryzują się minimalnym nakładem obliczeń on-line, jak również niewielkim nakładem pomiarowym i z tego też powodu mogą być stosowane na każdym etapie życia układu [Rut03]. W podejściu słownikowym uszkodzenia są wykrywane nie w przestrzeni parametrów, jak w podejściu SAT, lecz w przestrzeni pomiarów [Rut03].

### 2.2.1 Informacja diagnostyczna w słownikowych metodach testowania

Informację diagnostyczną w metodach testowania SBT, uzyskuje się poprzez pomiary wykonane dla zbioru punktów testowych  $P$ . Według definicji [Rut03]:

Punkt testowy  $P_q$  jest to zarówno węzeł testowy jak i parametry sygnałów pobudzających, np. punktem testowym jest węzeł dla jednej dyskretnej wartości parametru pobudzenia testowego.

Dla  $N_M$  węzłów i  $N_E$  wartości parametrów pobudzenia liczba punktów testowych wynosi  $N_M \cdot N_E$ . Parametrami pobudzenia testowego mogą być dla testowania DC poziomy pobudzenia a dla testowania AC częstotliwości testowe [Rut03]. Informacja diagnostyczna jest „pozyskiwana” na etapie przedtestowym, na podstawie danych otrzymanych z przeprowadzonych symulacji komputerowych dla wszystkich stanów testowanego układu. Aby podczas testu nie odrzucić układu nieuszkodzonego a nie przepuścić układu uszkodzonego, to na etapie przedtestowym należy uwzględnić rozrzut tolerancyjny parametrów elementów testowanego układu.

Uwzględnienie tolerancji projektowych parametrów elementów testowanego układu pociąga za sobą wprowadzenie pojęcia zbioru niejednoznaczności, który można zdefiniować następująco: zbiór niejednoznaczności (ang. ambiguity set)  $\mathbf{Y}_i$  jest to zbiór stanów obwodu, dla których obszary tolerancji odwzorowane w przestrzeń pomiarów nakładają się na siebie [Rut03]. Można zatem stwierdzić, że wyznaczonym na etapie przedtestowym punktom testowym przypisane są zbiory niejednoznaczności (ZN).

Dalsze omawianie zagadnień związanych z informacją diagnostyczną zostanie poprzedzone przedstawieniem przyjętych oznaczeń:

$\mathbf{S} = \{S_0, S_1, \dots, S_{N_S}\}$  - zbiór wszystkich stanów obwodu testowanego, gdzie  $N_S$  to liczba stanów „uszkodzonych”. Stan  $S_0$  to stan, w którym obwód jest nieuszkodzony. Pozostałe stany  $S_1, \dots, S_{N_S}$  to stany obwodu testowanego, w których jeden parametr przyjmuje wartość spoza przedziału tolerancji a pozostałe mieszczą się w tych przedziałach.

$\mathbf{M} = \{M_1, M_2, \dots, M_{N_M}\}$  - zbiór mierzonych wielkości elektrycznych (napięcia), gdzie  $N_M$  to liczba elementów tego zbioru.

$\mathbf{E} = \{T_1, \dots, T_a, \dots, T_{N_E}\}$  - zbiór wszystkich pobudzeń testowych, gdzie  $N_E$  jest licznością tego zbioru.

$T_a = \{T_1, T_2, \dots, T_{N_e}\}$  -  $a$ -ty wektor pobudzenia testowego, gdzie  $N_e$  to liczba elementów pobudzenia testowego ( $N_e$  jest także wymiarem przestrzeni poszukiwań).

$\mathbf{Y} = \{Y_0, \dots, Y_i, \dots, Y_{N_Y}\}$  - zbiór wszystkich obszarów niejednoznaczności, gdzie  $N_Y + 1$  jest licznością tego zbioru.

$Y_i = \{S_{k(N_{i1})}, \dots, S_{k(N_{ij})}\}$  - zbiór stanów obwodu dla  $i$ -tego obszaru niejednoznaczności, gdzie  $k(N_{i1}), \dots, k(N_{ij})$  są indeksami stanów obwodu tworzących zbiór  $Y_i$ , a  $N_{ij}$  jest licznością tego zbioru.

$\mathbf{P} = \{P_1, \dots, P_q, \dots, P_{N_P}\}$  - zbiór wszystkich punktów testowych, gdzie  $N_P$  jest licznością tego zbioru. Między zbiorem  $\mathbf{P}$  a zbiorami  $\mathbf{M}$  i  $\mathbf{E}$  zachodzi zależność  $\mathbf{P} = \mathbf{M} \times \mathbf{E}$ .

$\mathbf{P}_q = \{\mathbf{Y}_{k(N_{q1})}, \dots, \mathbf{Y}_{k(N_{qp})}\}$  - zbiór obszarów niejednoznaczności dla  $q$ -tego punktu testowego, gdzie  $k(N_{q1}), \dots, k(N_{qp})$  są indeksami obszarów niejednoznaczności tworzących zbiór  $\mathbf{P}_q$ , a  $N_{qp}$  jest licznością tego zbioru. Punkt testowy jest określony dla mierzonej wielkości  $M_i$  oraz pobudzenia testowego  $\mathbf{T}_a$ .

$\mathbf{P}^D = \{\mathbf{P}_{k(N_1)}, \dots, \mathbf{P}_{k(N_D)}\}$  - minimalny zbiór punktów testowych dla detekcji uszkodzenia w testowanym układzie, gdzie  $k(N_1), \dots, k(N_D)$  są indeksami punktów testowych tworzących zbiór  $\mathbf{P}^D$ , a  $N_D$  jest licznością tego zbioru.

$\mathbf{P}^L = \{\mathbf{P}_{k(N_1)}, \dots, \mathbf{P}_{k(N_L)}\}$  - minimalny zbiór punktów testowych dla jednoznacznej lokalizacji wszystkich uszkodzeń w testowanym układzie, gdzie  $k(N_1), \dots, k(N_L)$  są indeksami punktów testowych tworzących zbiór  $\mathbf{P}^L$ , a  $N_L$  jest licznością tego zbioru.

Wprowadzone nowe pojęcie „rozkład testowy” ma na celu pogrupowanie punktów testowych względem warunku opisanego zależnością (1), tj.: **rozkład testowy jest to zbiór takich punktów testowych, którym przypisane są takie same zbiory niejednoznaczności.**

$\mathbf{R}_n = \{\mathbf{P}_{k(N_{n1})}, \dots, \mathbf{P}_{k(N_{np})}\}$  - zbiór punktów testowych dla  $n$ -tego rozkładu testowego, gdzie  $k(N_{n1}), \dots, k(N_{np})$  są indeksami punktów testowych tworzących zbiór  $\mathbf{R}_n$  a  $N_{np}$  jest licznością tego zbioru. Między elementami zbioru musi być spełniony warunek:

$$\bigwedge_{(c,d \in \{k(N_{n1}), \dots, k(N_{np})\}) \wedge (c \neq d)} \left\{ (N_{cp} = N_{dp}) \wedge \bigwedge_{e \in \{1, \dots, N_{cp}\}} (\mathbf{Y}_{k(N_{ce})} = \mathbf{Y}_{k(N_{de})}) \right\} \quad (1)$$

Cechą rozpoznawczą każdego rozkładu testowego jest unikalna kombinacja zbiorów niejednoznaczności. Autor dopuszcza inny zapis matematyczny dla rozkładu testowego:

$$\mathbf{R}_n = [\mathbf{Y}_{k(N_{q1})}, \dots, \mathbf{Y}_{k(N_{qp})}]$$

$\mathbf{R} = \{\mathbf{R}_0, \dots, \mathbf{R}_n, \dots, \mathbf{R}_{N_R}\}$  - zbiór wszystkich rozkładów testowych, gdzie  $N_R + 1$  jest licznością tego zbioru. Liczność tego zbioru jest mniejsza bądź równa liczbie elementów zbioru  $\mathbf{P}$  ( $N_R \leq N_p$ ).

$\mathbf{R}_i^D = \{\mathbf{R}_{k(N_1)}, \dots, \mathbf{R}_{k(N_D)}\}$  -  $i$ -ty minimalny zbiór rozkładów testowych dla detekcji uszkodzenia w testowanym układzie, gdzie  $k(N_1), \dots, k(N_D)$  są indeksami rozkładów testowych tworzących zbiór  $\mathbf{R}_i^D$  a  $N_D$  jest licznością tego zbioru.

$\mathbf{R}_i^L = \{\mathbf{R}_{k(N_1)}, \dots, \mathbf{R}_{k(N_L)}\}$  -  $i$ -ty minimalny zbiór rozkładów testowych dla lokalizacji uszkodzenia w testowanym układzie, gdzie  $k(N_1), \dots, k(N_L)$  są indeksami rozkładów testowych tworzących zbiór  $\mathbf{R}_i^L$  a  $N_L$  jest licznością tego zbioru.



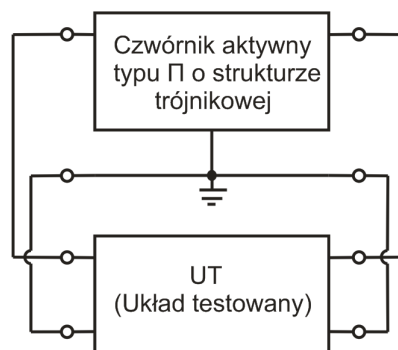
### 3 Czwórnikowa metoda testowania analogowych układów elektronicznych

W pracy została zaproponowana nowa metoda testowania analogowych układów elektronicznych, którą oznaczono skrótem 4-tBT (ang. Four-terminal Based Test). W metodzie testowania 4-tBT do testowanego układu dołączany jest zewnętrzny czwórnik testujący. Głównym problemem w zaproponowanej metodzie jest dobór struktury i wartości elementów czwórnika testującego tak, aby była możliwa detekcja, lokalizacja i identyfikacja uszkodzeń UT.

#### 3.1 Ogólny opis metody 4-tBT

Metoda 4-tBT jest metodą z symulacją przedtestową i należy do grupy metod sterowanych uszkodzeniami. Ideą metody 4-tBT jest dołączenie do testowanego układu zewnętrznego czwórnika testującego. Z uwagi na to, iż testowany układ jest postrzegany jak czwórnik, to połączenie go z czwórnikiem testującym jest klasyfikowane jako równoległe połączenie dwóch czwórników (Rys. 3-1). Czwórniki te muszą spełniać tzw. warunki regularności [Miko84]. Elementem aktywnym w czwórniku testującym może być źródło DC, AC, specjalizowane. Elementy czwórnika testującego są elementami regulowanymi, których nastawy są wyznaczane w trzecim etapie metody 4-tBT.

Proponowana metoda 4-tBT jest metodą testowania z użyciem „wielowymiarowej przestrzeni poszukiwań” [Kyz09c]. Wartości elementów czwórnika testującego (pobudzenie testowe  $T_a$ ) określają punkt testowy  $P_q$ , a zatem w ujęciu matematycznym, są wymiarami przestrzeni poszukiwań  $\mathcal{R}^S$ . Termin „wielowymiarowa przestrzeń poszukiwań” ma za zadanie podkreślić różnicę między tradycyjną metodą testowania TTM (ang. Traditional Testing Method) a zaproponowaną przez Autora metodą 4-tBT. TTM to metoda testowania z jednowymiarową przestrzenią poszukiwań (wymiar przestrzeni poszukiwań jest częstotliwość generatora  $f_G$ ). W metodzie 4-tBT, to parametry elementów czwórnika testującego stanowią zmienne przestrzeni poszukiwań (PP)  $\mathcal{R}^S$  [Kyz08b].

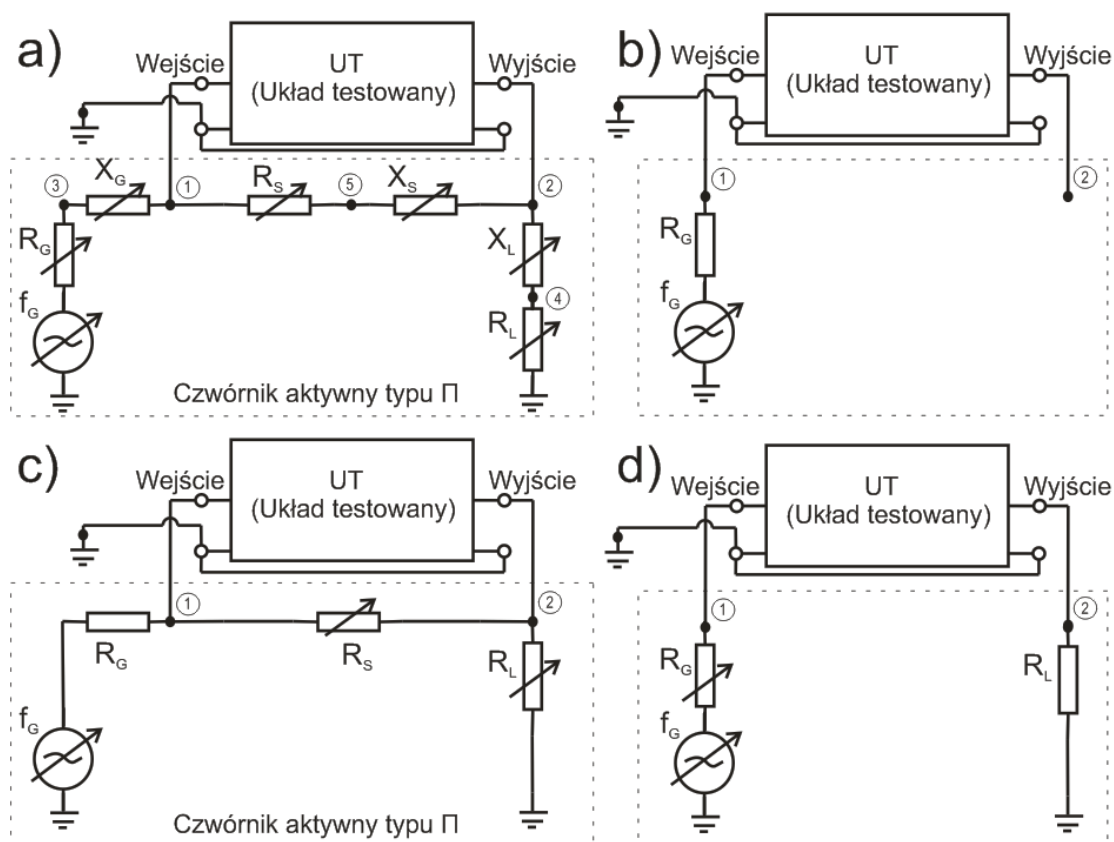


Rys. 3-1 Czwórnik testujący i układ testowany jako równoległe połączenie dwóch czwórników.

Metoda 4-tBT wpisuje się w dwa główne (wspomniane na wstępie) nurty testowania i diagnostyki AUE: lepszej separowalności uszkodzeń UT oraz przyspieszenia procesu testowania. Poprawa separowalności uszkodzeń UT związana jest, m.in. z dodatkowymi węzłami dostępnymi pomiarowo, które znajdują się wewnątrz czwornika testującego oraz co za tym idzie, ze zwiększeniem informacji diagnostycznej. Natomiast przyspieszenie procesu testowania związane jest z wykorzystaniem testowania sygnałem multiton oraz syntezy dwójnika RLC.

### 3.1.1 Dobór struktury czwornika testującego

Problem znalezienia struktury i wartości elementów czwornika testującego, tak aby była możliwa detekcja czy lokalizacja uszkodzenia w UT, jest złożonym zagadnieniem. W celu uproszczenia problemu zdecydowano się na przyjęcie konkretnej struktury czwornika testującego, którą stanowić będzie czwornik aktywny typu  $\Pi$  (rys. 3-2a). Czwornik aktywny typu  $\Pi$  zawiera 6 regulowanych elementów pasywnych. Elementy z indeksem „L” ( $R_L, X_L$ ) stanowią obciążenie impedancyjne układu testowanego, elementy z indeksem „G” ( $R_G, X_G$ ) stanowią impedancję NZN, elementy z indeksem „S” ( $R_S, X_S$ ) stanowią pętlę sprzężenia zwrotnego łączącą wyjście z wejściem UT. Liczba dostępnych pomiarowo węzłów jest równa 5 [Kyz09b]. Na Rys. 3-2b, c, d przedstawiono różne uproszczone wersje czwornika testującego.



Rys. 3-2 Wariant metody 4-tBT: a) z siedmiowymiarową PP, c) z trójwymiarową PP, d) z dwuwymiarową PP, b) tradycyjna metoda testowania TTM z pobudzeniem AC.

### 3.1.2 Dobór wartości elementów czwórnika testującego

Wyznaczenie wartości elementów czwórnika testującego w metodzie 4-tBT oznacza znalezienie takich punktów testowych, dla których możliwa będzie detekcja lub lokalizacja wszystkich uszkodzeń UT. Do wyznaczania wartości elementów aktywnych i pasywnych czwórnika testującego może być zastosowana metoda analityczna (opisana dalej) lub metoda opierająca się na analizie testowanego układu w symulatorze Pspice i wykorzystaniu algorytmu rojowego PSO (ang. Particle Swarm Optimization) (**podrozdział 3.2.2**) [Kyz08b].

Metoda analityczna jest techniką wykorzystującą wartości elementów macierzy admitancyjnej  $\mathbf{y}^D = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}$  czwórnika. Z połączenia równoległego dwóch czwórników powstaje nowy czwórnik, którego macierz admitancyjna jest sumą macierzy admitancyjnych czwórników składowych:

$$\mathbf{y}^T = \mathbf{y}^D + \mathbf{y}^S \quad (2)$$

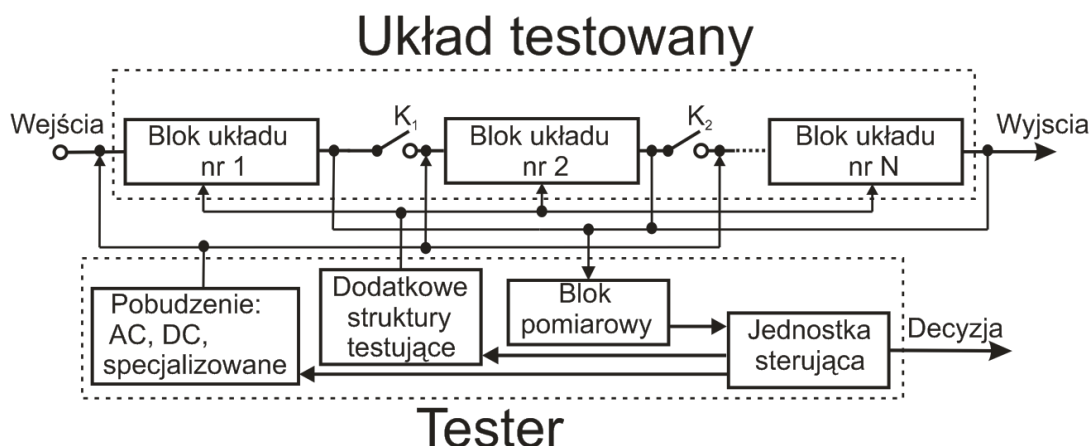
Macierz admitancyjna czwórnika testującego jest oznaczana jako  $\mathbf{y}^D$ , testowanego układu jest oznaczana jako  $\mathbf{y}^S$ , a czwórnika powstałego z połączenia równoległego czwórnika testującego i testowanego układu jest oznaczana jako  $\mathbf{y}^T$ . Metoda analityczna polega na wyznaczeniu macierzy admitancyjnej  $\mathbf{y}_i^S$  układu testowanego dla każdego ze stanów obwodu,  $i = 0, 1, \dots, N_S$ . Aby uzyskać jednoznaczną detekcję uszkodzenia, w testowanym układzie należy dobrać tak wartości elementów (współczynniki macierzy admitancyjnej  $\mathbf{y}^D$ ) czwórnika testującego, aby współczynniki macierzy admitancyjnej  $\mathbf{y}_0^T$  układu nieuszkodzonego były różne od współczynników macierzy admitancyjnych układów uszkodzonych:

$$\mathbf{y}_0^T \neq \mathbf{y}_i^T; i = 1, \dots, N_S \quad (3)$$

Alternatywną techniką wyznaczania wartości elementów czwórnika aktywnego typu  $\Pi$  jest użycie do tego celu symulatora Pspice i algorytmu rojowego PSO [Kyz09], [Kyz09a]. Takie podejście zostało zaproponowane przez Autora (nie wymaga ono znajomości macierzy  $\mathbf{y}^S$ ).

### 3.1.3 Tester AUE dla metody 4-tBT

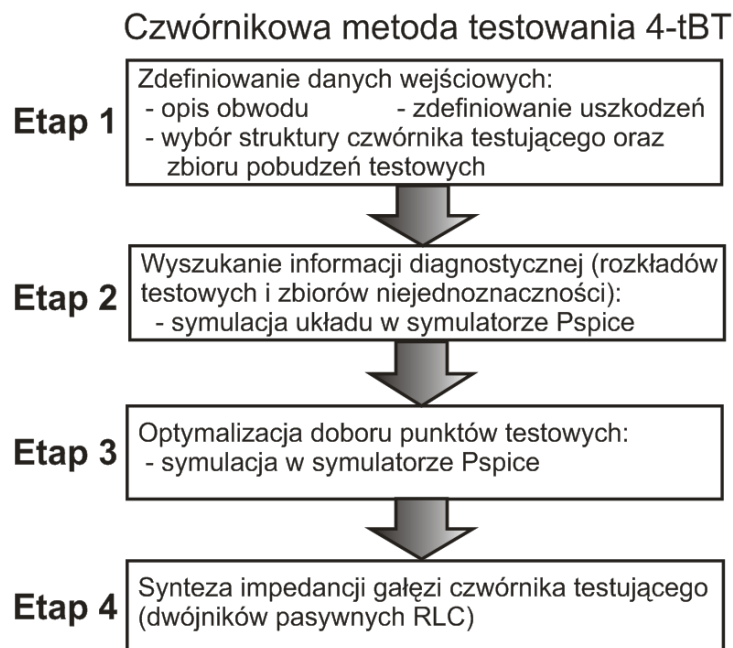
Na rysunku 3-3 został przedstawiony tester w metodzie 4-tBT [Kyz10]. Oprzyrządowanie testera składa się z: bloku pobudzeń, bloku dodatkowych struktur testujących, bloku pomiarowego, bloku jednostki sterującej. Po nastawieniu wyznaczonej wartości pobudzenia i wartości elementów pasywnych czwórnika testującego odbywa się pomiar wielkości elektrycznych w węzłach dostępnych pomiarowo. Na podstawie pomierzonych wartości podejmowana jest decyzja o stanie układu (detekcja, lokalizacja uszkodzenia).



Rys. 3-3 Schemat budowy testera AUE w metodzie 4-tBT.

## 3.2 Etapy metody 4-tBT

Na rysunku 3-4 przedstawione są etapy konstrukcji słownika uszkodzeń oraz wyznaczania punktów testowych dla metody 4-tBT z pobudzeniem AC.



Rys. 3-4 Etapy metody 4-tBT.

Równoległe z opisem poszczególnych etapów, będzie analizowany prosty przykład obliczeniowy z zastosowaniem wariantu metody 4-tBT z dwuwymiarową przestrzenią poszukiwań  $\mathcal{R}^S$ , w której jednym wymiarem jest częstotliwość  $f_G$  a drugim jest rezystancja  $R_L$  (rys. 3-5).

### 3.2.1 Pierwszy etap metody 4-tBT

Pierwszy etap metody 4-tBT to zdefiniowanie przez inżyniera projektanta danych wejściowych:

- a) wytypowanie uszkodzeń w testowanym układzie,
- b) określenie wartości tolerancji projektowych elementów testowanego układu,
- c) określenie parametrów analizy Monte Carlo w symulatorze Pspice,
- d) dla czwórnika testującego określenie wymiaru oraz obszaru przestrzeni poszukiwań,
- e) określenie parametrów algorytmów heurystycznych użytych w drugim i czwartym etapie metody 4-tBT (funkcji celu, wielkości populacji, itd.),
- f) określenie typu klasyfikatora spośród opisanych w literaturze [Rut03].

#### *Wyznaczenie wymiarów oraz obszaru przestrzeni poszukiwań $\mathcal{R}^S$*

W badaniach ograniczono się do struktury czwórnika typu  $\Pi$ , tj. czwórnika scharakteryzowanego sześcioma parametrami rezystancyjno-reaktancyjnymi ( $R_G, X_G, R_S, X_S, R_L, X_L$ ) oraz jednym parametrem źródła, którym jest jego częstotliwość  $f_G$ . Dopuszczalna jest także każda inna struktura, która jest uproszczeniem czwórnika aktywnego typu  $\Pi$ , np. brak elementów w pętli sprzężenia zwrotnego (rys. 3-2d). Każdy z parametrów elementu czwórnika testującego jest wymiarem w  $D$ -wymiarowej przestrzeni poszukiwań (PP)  $\mathcal{R}^S$ , zatem maksymalna liczba wymiarów wynosi 7.

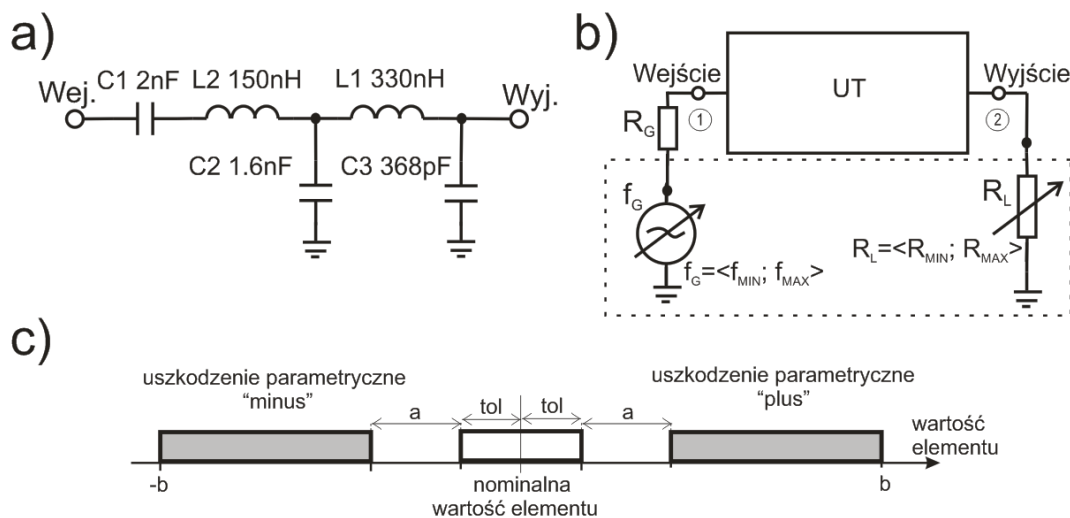
Mając przestrzeń poszukiwań  $\mathcal{R}^S$ , której wymiar wyznaczony jest liczbą (regulowanych) dobieranych parametrów, należy określić rozmiar obszaru poszukiwań (rozwiązań)  $\mathcal{R}^S$ . Ściany obszaru przestrzeni poszukiwań  $\mathcal{R}^S$  można wyznaczyć bazując na wiedzy/doświadczeniu inżyniera projektanta lub z wykorzystaniem macierzy admitancyjnej nieuszkodzonego UT.

Zaproponowana metoda wyznaczania obszaru przestrzeni poszukiwań polega na obliczeniu wartości współczynników (części *Re* i *Im*) macierzy admitancyjnej testowanego układu liniowego, dla wcześniej ustalonego zakresu częstotliwości. Reguła przyporządkowania wyniku z definicji współczynników macierzy admitancyjnej czwórnika [Miko84], tj.:

- współczynnik  $y_{11}$  to admitancja wejściowa czwórnika – przedziały wartości dla elementów  $R_G$  i  $X_G$  powinny być ustalone w odniesieniu do wartości  $y_{11}$ .
- współczynnik  $y_{22}$  to admitancja wyjściowa czwórnika – przedziały wartości dla elementów  $R_L$  i  $X_L$  powinny być ustalone w odniesieniu do wartości  $y_{22}$ .

- współczynnik  $y_{12}$  to admitancja zwrotna czwórnika – przedziały wartości dla elementów  $R_S$  i  $X_S$  powinny być ustalone w odniesieniu do wartości  $y_{12}$ .

Parametr elementu aktywnego (częstotliwość  $f_G$ ) jako jeden z wymiarów przestrzeni poszukiwań  $\mathcal{R}^S$  odgrywa najważniejszą rolę wśród wszystkich zmiennych przestrzeni poszukiwań ponieważ jest zmienną niezależną UT i czwórnika testującego. Reaktancje czwórnika testującego zależą od częstotliwości  $f_G = \langle f_{Gmin}, f_{Gmax} \rangle$ . Z tego też powodu przedział częstotliwości powinien być ustalony jako pierwszy. Dla ustalenia zakresu częstotliwości  $f_G$  najpierw wyznaczana jest charakterystyka amplitudowa nieuszkodzonego układu testowanego w „szerokim zakresie częstotliwości” (przyjęto pasmo  $f_G = \langle 0,01f_{odn}, 100f_{odn} \rangle$ , gdzie  $f_{odn}$  oznacza częstotliwość „charakterystyczną” dla testowanego układu. Następnie wybierany jest taki zakres częstotliwości ( $f_{Gmin}$  i  $f_{Gmax}$ ), dla którego charakterystyka amplitudowa charakteryzuje się „zmiennością”. Zakresy pozostałych parametrów obszaru PP  $\mathcal{R}^S$  są ustalane, w odniesieniu do wartości *min* i *max* odpowiednich współczynników macierzy admitancyjnej UT, wyznaczonych dla ustalonego wcześniej zakresu częstotliwości  $f_G = \langle f_{Gmin}, f_{Gmax} \rangle$ .



Rys. 3-5 a) UT; b) UT wraz z czwórnikiem testującym; c) zakresy symulowanych uszkodzeń.

Dla układu obliczeniowego (rys. 3-5a) przyjęto następujące założenia projektowe:

- 1) uszkodzenia parametryczne dla wszystkich elementów układu ( $a = 15\%$ ,  $b = 50\%$ , rys. 3-5c), liczba stanów UT jest równa 11 (Tab. 3-1), tolerancja elementów układu  $tol_C = tol_L = 3\%$ , liczba analiz Monte Carlo  $N_{MC} = 80$ , mierzona wartość to napięcie wyj.  $V_2$ ,
- 2) N-tBT z dwuwymiarową przestrzenią poszukiwań  $\mathcal{R}^S$  (rys. 3-5b), w której jednym wymiarem jest  $f_G$  a drugim jest  $R_L$ . Ściany obszaru przestrzeni poszukiwań  $\mathcal{R}^S$  opisane są:  $f_G = \langle 2,2, 20,2 \rangle [MHz]$ ,  $R_L = \langle 0,1, 100 \rangle [\Omega]$ .

Tabela 3-1 Stany UT dla układu dopasowania impedancyjnego.

Stan UT	Opis stanu	Stan UT	Opis stanu	Stan UT	Opis stanu	Stan UT	Opis stanu
S <sub>0</sub>	nieuszkodzony	S <sub>3</sub>	L <sub>2</sub> minus	S <sub>6</sub>	L <sub>1</sub> plus	S <sub>9</sub>	C <sub>3</sub> minus
S <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> minus	S <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> plus	S <sub>7</sub>	L <sub>1</sub> minus	S <sub>10</sub>	C <sub>1</sub> plus
S <sub>2</sub>	L <sub>2</sub> plus	S <sub>5</sub>	C <sub>2</sub> minus	S <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> plus		

### 3.2.2 Drugi etap metody 4-tBT

Podstawowym etapem konstrukcji słownika sygnaturowego w metodzie 4-tBT jest odwzorowanie obszarów tolerancji obwodu nieuszkodzonego i obwodów z wytypowanymi uszkodzeniami z przestrzeni parametrów w przestrzeń pomiarów. W wyniku takiego odwzorowania otrzymuje się pewną aproksymację obszaru tolerancji w przestrzeni pomiarów [Rut03]. Odwzorowanie to odbywa się w wielowymiarowej przestrzeni poszukiwań  $\mathcal{R}^S$ , co powoduje, że problem wyszukania informacji diagnostycznej jest złożony. Problem maskowania uszkodzeń przez tolerancje projektowe parametrów obwodu został rozwiązany za pomocą wielokrotnych symulacji wszystkich stanów obwodu, dla losowo wybranych parametrów z przedziału tolerancji przy użyciu metody Monte Carlo [Bake96], [Bali96], [Rut03], [Star04].

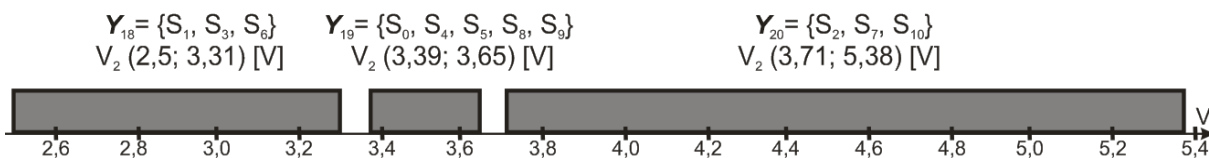
Drugi etap metody 4-tBT polega na wyszukaniu informacji diagnostycznej (wyznaczenie zbioru obszarów niejednoznaczności  $\mathbf{Y}$  i zbioru rozkładów testowych  $\mathbf{R}$ ) z obszaru przestrzeni poszukiwań  $\mathcal{R}^S$ . W metodzie 4-tBT problem wyszukania informacji diagnostycznej zdecydowano się rozwiązać wykorzystując podejście heurystyczne z algorytmem rojowym PSO [Kyz09].

#### *Pojęcie informacji diagnostycznej w metodzie 4-tBT*

Informacją diagnostyczną w metodzie 4-tBT jest informacja zawarta w zbiorze obszarów niejednoznaczności  $\mathbf{Y}$  oraz zbiorze rozkładów testowych  $\mathbf{R}$ . Zbiory te wyznaczone są na podstawie pomiarów wykonanych dla elementów zbioru punktów testowych  $\mathbf{P}$ . Dołączenie czwórnika testującego pozwoliło w sposób znaczący zwiększyć liczbę punktów testowych, przez zwiększenie tak liczby węzłów testowych jak i warunków w jakich badany jest UT [Kyz09d].

Na rysunku 3-6 przedstawione są zbiory niejednoznaczności (ZN) dla punktu testowego  $\mathbf{P}_{10}$  (otrzymanego dla analizowanego UT), w którym:  $f_G = 9,87\text{MHz}$ ;  $R_L = 7,6\Omega$ .

$\mathbf{P}_{10}$  dla  $f_G = 9,87\text{MHz}$ ,  $R_L = 7,6\Omega$



Rys. 3-6 Pomiary dla punktu testowego  $\mathbf{P}_{10}$ .

### Miara informacji diagnostycznej dla punktu testowego - $S_{d_{P_q}}$

Miara, która dla punktu testowego  $P_q$  (któremu przypisane są określone zbiory niejednoznaczności) oceni jak zbiory niejednoznaczności są położone względem siebie jest  $S_{d_{P_q}}$  [Kyz09], [Kyz10b]. W zależności od wartości pobudzenia testowego, zarówno położenie jak i szerokość ZN, które są przypisane do punktów testowych ulegają zmianie.

Z punktu widzenia diagnostyki ważnym jest, aby zbiory niejednoznaczności przypisane dla punktu testowego były jednocześnie jak najwęższe a odległości między nimi były jak największe (liczba informacji diagnostycznej jest wtedy największa). Miara  $S_{d_{P_q}}$  dla punktu testowego umożliwia wybranie takiej wartości pobudzenia testowego, dla której rozmieszczenie zbiorów niejednoznaczności (przypisanych dla punktu testowego) jest najlepsze [Kyz10b]. Wartość miary  $S_{d_{P_q}}$  dla punktu testowego  $P_q$  jest średnią arytmetyczną miar  $S_{d_{Y_i}}$  wyznaczonych dla zbiorów niejednoznaczności tego punktu testowego:

$$S_{d_{P_q}} = \frac{1}{N_{qp}} \sum_{p=1}^{N_{qp}} S_{d_{Y_{k(N_{qp})}}}; S_{d_{Y_{k(N_{qp})}}} - \text{miara wyznaczona dla ZN } Y_{k(N_{qp})} \quad (1)$$

Miara  $S_{d_{Y_i}}$  dla zbioru niejednoznaczności  $Y_i$  jest wyznaczany na podstawie poniższego wzoru:

$$S_{d_{Y_i}} = (\min \{S_{dist\_L}; S_{dist\_R}\}) \cdot \left(1 + \frac{D_x}{D_x + W_G}\right); \quad x = \begin{matrix} L; \text{ jeżeli } S_{dist\_R} < S_{dist\_L} \\ R; \text{ jeżeli } S_{dist\_R} \geq S_{dist\_L} \end{matrix} \quad (2)$$

$$S_{dist\_L} = \frac{D_L}{W_L + W_G}; \quad \begin{matrix} D_L - \text{ dystans ZN } Y_i \text{ do lewego 'sąsiada'} \\ W_L - \text{ szerokość lewego 'sąsiada'} \\ W_G - \text{ szerokość } Y_i \end{matrix} \quad (3)$$

$$S_{dist\_R} = \frac{D_R}{W_R + W_G}; \quad \begin{matrix} D_R - \text{ dystans ZN } Y_i \text{ do prawego 'sąsiada'} \\ W_R - \text{ szerokość prawego 'sąsiada'} \\ W_G - \text{ szerokość } Y_i \end{matrix} \quad (4)$$

### Wykorzystanie algorytmu PSO do wyszukiwania informacji diagnostycznej

Główne przyczyny, które zadecydowały o użyciu algorytmu PSO do wyszukiwania informacji diagnostycznej to efektywność takiego podejścia do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych NP-trudnych oraz to, że informacja diagnostyczna w obszarze przestrzeni poszukiwań  $\mathbb{R}^S$  jest rozmieszczona w sposób nierównomierny [Ken01], [Kyz10c], [Mich96].

Zadaniem algorytmu heurystycznego PSO w drugim etapie metody 4-tBT jest optymalizacja (znalezienie maksymalnej wartości) miary  $S_{d_{Y_i}}$ . Osobniki populacji PSO podczas procesu optymalizacji  $S_{d_{Y_i}}$  pozwalają na znalezienie nowych zbiorów niejednoznaczności i rozkładów testowych. Optymalizacja miary  $S_{d_{Y_i}}$  jest następnie powtarzana dla każdego zbioru



niejednoznaczności. Zastosowane podejście wyszukiwania informacji diagnostycznej można zatem podsumować następująco:

Wyszukiwanie informacji diagnostycznej (rozkładów testowych  $R_n$  i zbiorów niejednoznaczności  $Y_i$ ) za pomocą algorytmu rojowego nie odbywa się „wprost”. Wyszukiwanie to jest skutkiem ubocznym działania algorytmu PSO, którego podstawowym zadaniem jest optymalizacja miary  $S_{d,Y_i}$  zbiorów niejednoznaczności.

Proces wyszukiwania informacji diagnostycznej rozpoczyna się losową inicjalizacją populacji osobników algorytmu PSO. Umieszczenie osobnika populacji w obszarze przestrzeni poszukiwań  $\mathcal{R}^S$  jest równoznaczne z otrzymaniem punktu testowego, który znajduje się w tym miejscu PP. Na podstawie danych uzyskanych z symulacji UT dla punktu testowego wyznaczone są zbiory niejednoznaczności. Otrzymane w ten sposób rozkład testowy i zbiory niejednoznaczności są numerowane i zapamiętywane.

Następnym krokiem jest optymalizacja (szukanie maksymalnej wartości) miary  $S_{d,Y_0}$  zbioru niejednoznaczności  $Y_0$ . Podczas optymalizacji kolejne pokolenia osobników PSO znajdują rozkłady testowe oraz zbiory niejednoznaczności i jeżeli zawierają one nową informację diagnostyczną to są numerowane i zapamiętywane. Warunkiem zakończenia optymalizacji miary  $S_{d,Y_0}$  zbioru niejednoznaczności jest brak poprawy rozwiązania w pięciu kolejnych pokoleniach populacji PSO. Po zakończeniu optymalizacji zbioru niejednoznaczności  $Y_0$ , cały proces jest powtarzany kolejno dla wszystkich zbiorów niejednoznaczności. Cały proces wyszukiwania informacji diagnostycznej kończy się wraz z zoptymalizowaniem miary  $S_{d,Y_i}$  ostatniego ZN.

W analizowanym przykładzie obliczeniowym pierwsza (losowa) populacja dwunastu osobników algorytmu PSO wyszukuje 8 zbiorów niejednoznaczności i 4 rozkłady testowe. Dysponując wstępną informacją diagnostyczną można przystąpić do procesu optymalizowania wartości  $S_{d,Y_0}$  zbioru niejednoznaczności  $Y_0$ . W tym celu, algorytm PSO potrzebuje 24 pokoleń populacji osobników do znalezienia największej wartości miary  $S_{d,Y_0}$ . Następnie cały proces jest powtarzany dla każdego zbioru niejednoznaczności. Podczas optymalizacji  $S_{d,Y_{21}}$  ostatniego zbioru niejednoznaczności  $Y_{21}$ , żaden nowy obszar niejednoznaczności i rozkład testowy nie zostaje wyszukany, co w rezultacie powoduje, że proces wyszukiwania informacji diagnostycznej może zostać zakończony [Kyz10c].

### 3.2.3 Trzeci etap metody 4-tBT

Trzeci etap metody 4-tBT to optymalizacja doboru punktów testowych. Problem doboru punktów testowych polega na tym, aby przy jak najmniejszej liczbie pomiarów (punktów testowych) móc odróżnić obwód uszkodzony od nieuszkodzonego, jednocześnie nie wnikając w naturę uszkodzenia [Rut03]. Dane wejściowe dla tego etapu to informacja diagnostyczna wyszukana w drugim etapie metody 4-tBT. Dane wyjściowe to optymalne (minimalne) zbiory

punktów testowych  $\mathbf{P}^D$  dla detekcji uszkodzenia i  $\mathbf{P}^L$  dla lokalizacji uszkodzenia. Zbiór danych wejściowych zawiera skończoną liczbę elementów (rozkładów testowych, ZN), zatem dobór punktów testowych jest problemem optymalizacyjnym kombinatorycznym.

### *Optymalizacja doboru punktów testowych*

Omawiany problem optymalizacji doboru punktów testowych można podzielić na dwa problemy składowe:

- 1) określenie liczby elementów (rozkładów testowych), które zawiera minimalny zbiór  $\mathbf{R}_i^D$  i  $\mathbf{R}_i^L$  – operowanie na zbiorze rozkładów testowych  $\mathbf{R}$ ,
- 2) znalezienie najlepszego minimalnego zbioru punktów testowych  $\mathbf{P}^D$  i  $\mathbf{P}^L$  – operowanie na zbiorze punktów testowych  $\mathbf{P}$ .

Rozwiązanie pierwszego problemu składowego jest sprawą oczywistą. Drugi problem składowy to następstwo faktu, że może istnieć wiele zbiorów punktów testowych  $\mathbf{P}^D$  i  $\mathbf{P}^L$  z minimalną liczbą elementów i należy wybrać ten najlepszy.

W problemie optymalizacji doboru punktów testowych można zauważyć pewne specyficzne cechy (stwierdzone przez Autora na podstawie przeprowadzonych badań) [Kyz09]:

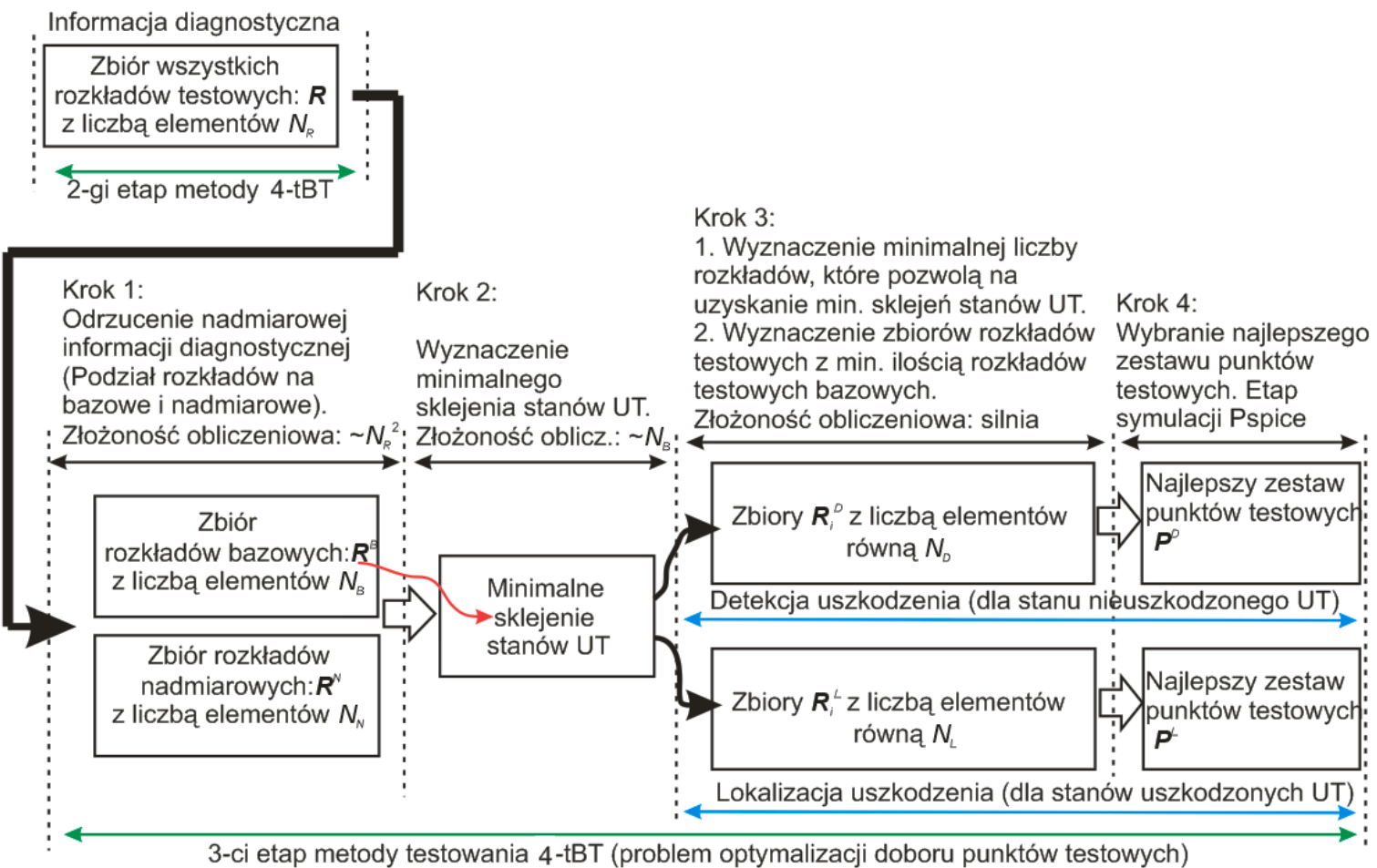
- 1) rozwiązanie problemu, tj. minimalny zbiór punktów testowych, zazwyczaj zawiera nie więcej niż 4 elementy,
- 2) liczbę elementów w wejściowym zbiorze rozkładów testowych  $\mathbf{R}$  można zredukować, uwzględniając fakt, że część rozkładów testowych nie wnosi nowej informacji o sklejeniach stanów testowanego obwodu,

Wymieniona w punkcie 2) cecha rozkładów testowych stanowi podstawę do podziału zbioru rozkładów testowych  $\mathbf{R}$  na podzbiory bazowych rozkładów  $\mathbf{R}^B$  i nadmiarowych rozkładów  $\mathbf{R}^N$ . Cechą rozkładów testowych należących do zbioru  $\mathbf{R}^B$  jest to, że każdy z nich wnosi nową informację o występujących sklejeniach stanów testowanego układu. Wszystkie pozostałe rozkłady testowe, które nie należą do zbioru  $\mathbf{R}^B$ , zawierają nadmiarową informację (w odniesieniu do informacji „zawartej” w zbiorze  $\mathbf{R}^B$ ) i są one wliczane do zbioru zbiorów nadmiarowych rozkładów testowych  $\mathbf{R}^N$ . Rozkłady testowe znajdujące się w zbiorze  $\mathbf{R}^N$  z punktu widzenia problemu optymalizacji doboru punktów testowych nie odgrywają żadnej roli.

### *Dedykowana metoda optymalizacji doboru punktów testowych*

W pracy Autor zaproponował własną dedykowaną metodę optymalizacji doboru punktów testowych. Metoda ta należy do rodziny metod deterministycznych a jej główną zaletą jest

Rys. 3-7 Dedykowana metoda optymalizacji doboru punktów testowych.



pewność, że znalezione rozwiązanie zawiera minimalną liczbę elementów (metody dołączania, eliminacji nie gwarantują znalezienia optymalnego rozwiązania).

Istotą dedykowanej metody (rys. 3-7) jest zmniejszenie rozmiaru problemu poprzez wykorzystanie podanych wcześniej specyficznych cech rozwiązywanego problemu (możliwość rozłożenia tego problemu na części składowe). Należy podkreślić fakt, iż opisywana metoda zmniejsza rozmiar problemu (rozumiany jako wartość wyrażenia  $\binom{N}{k}$ ), lecz nie zmienia charakteru złożoności obliczeniowej, która nadal jest typu silnia  $O(n!)$ . Uzyskany najlepszy zbiór punktów testowych  $P^L$  jest przedstawiony w tabeli 3-2.

Tabela 3-2 Zbiór najlepszych punktów testowych  $P^L$  dla lokalizacji uszkodzenia w UT.

$P_q$	Pobudzenie testowe $T_a = \{f_G, R_L\}$	Zbiory niejednoznaczności dla punktu testowego $P_q$ wraz z zakresami napięć (w voltach)			Rozkłady testowe $R_n$
$P_1$	$f_{G1} = 3,043 \text{ MHz}$ , $R_{L1} = 98,7 \Omega$	$Y_2$ $V_2 = (3.5: 5.1)$	$Y_3$ $V_3 = (5.2: 5.6)$	$Y_3$ $V_3 = (5.7: 6.7)$	$P_1 \in R_2$
$P_2$	$f_{G2} = 9,85 \text{ MHz}$ , $R_{L2} = 9,04 \Omega$	$Y_{12}$ $V_2 = (2.9: 3.8)$	$Y_{13}$ $V_3 = (3.9: 4.3)$	$Y_7$ $V_7 = (4.33: 6.05)$	$P_2 \in R_{14}$
$P_4$	$f_{G4} = 20,2 \text{ MHz}$ , $R_{L4} = 100 \Omega$	$Y_{11}$ $V_2 = (2.3: 4.3)$		$Y_{14}$ $V_3 = (4.8: 23.7)$	$P_4 \in R_{13}$

### 3.2.4 Czwarty etap metody 4-tBT

W testowaniu i diagnostyce AUE koszt testu układu jest drugim najważniejszym czynnikiem zaraz po skuteczności diagnozy [Milo94]. Przyjmuje się, że dla AUE od 20% do 40% ceny układu związane jest z kosztami testowania [Milo98]. Koszt testowania jest liniowo zależny od czasu testu, dlatego też redukcja czasu testu może realnie obniżyć koszt układu.

Czas testu można skrócić na dwa sposoby. Pierwszy z nich to optymalizacja doboru punktów testowych (trzeci etap metody 4-tBT). Drugi, to sposób sprzętowy, tj. zastosowanie specjalizowanego testera [Kyz10a].

Zaproponowane podejście sprzętowej redukcji czasu testu dla metody 4-tBT łączy w sobie dwie techniki: sygnał multiton oraz syntezę impedancji dwójnika RLC (rys. 3-8) [Golo07b]. Parametry elementów pasywnych czwórnik testującego (rezystancje i reaktancje) można potraktować jako część rzeczywistą i urojoną impedancji odpowiednich gałęzi czwórnik. Jeżeli uwzględnić fakt, że wartość impedancji  $Z(j\omega)$  jest funkcją częstotliwości pobudzenia AC (elementu aktywnego czwórnik testującego) to otrzymamy  $Z(j\omega) = Re(\omega) + jIm(\omega)$ . Dzięki takiemu zapisowi, mechanizm identyczny jak w podejściu multiton można zastosować dla elementów pasywnych czwórnik testującego, tj. zaprojektować taki dwójnik RLC, który będzie realizował zadane wartości impedancji gałęzi czwórnik aktywnego typu II (problem syntezy impedancji dwójnika RLC - rozwiązany przy użyciu algorytmu programowania genetycznego).

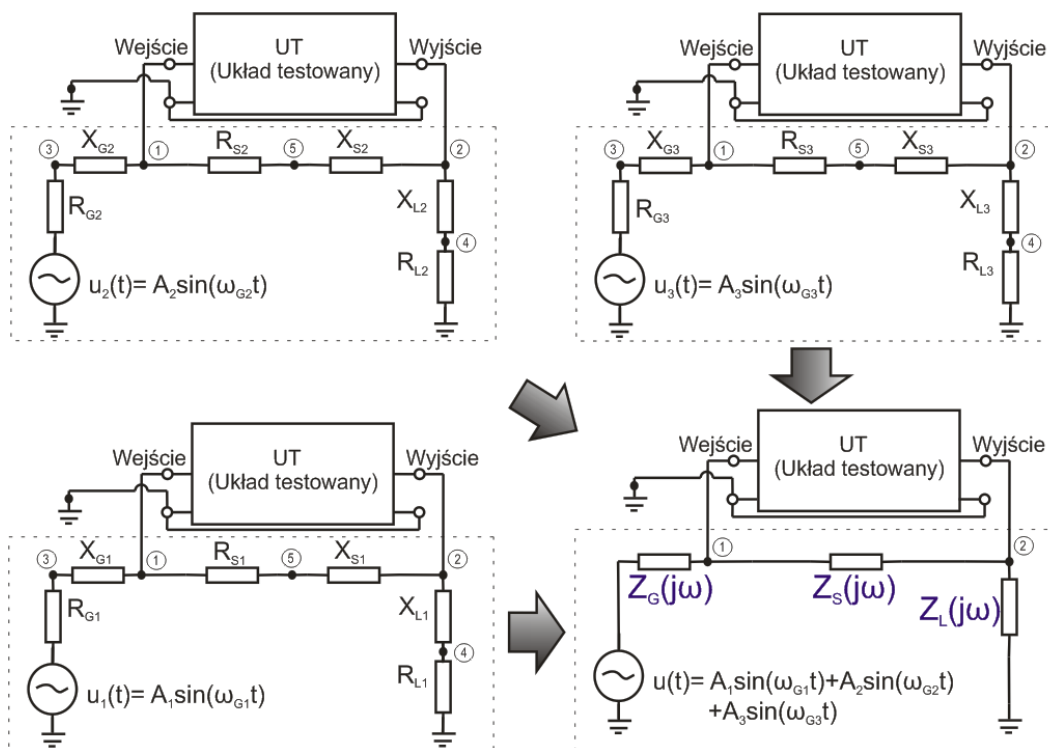
W analizowanym przykładzie obliczeniowym do UT jest dołączony tylko jeden element tj. rezystancja obciążenia  $R_L$ . Zatem, sprzętowa redukcja czasu testu będzie polegała na

zaprojektowaniu dwójników RLC, które będą realizowały wartości rezystancji ze zbioru punktów testowych  $P^L$  (tabela 3-2). Dla lokalizacji uszkodzenia otrzymana struktura dwójnika RLC, realizująca dwie wybrane wartości ze zbioru  $P^L$ , została przedstawiona na rysunku 3-9. Wartości impedancji realizowane przez tą strukturę przedstawiono w tabeli 3-3.

Tabela 3-3 Realizowane wartości impedancji przez dwójnik RLC.

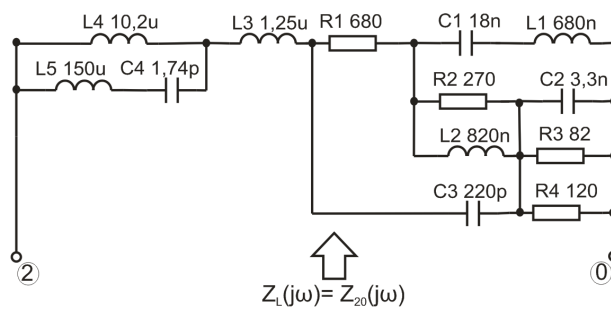
Wartość $f_G$ z zbioru punktów testowych $P^L$	Wartość $R_L$ z zbioru punktów testowych $P^L$	Wartości $Z_{RLC}(j\omega)$ realizowane przez dwójnik RLC	$\delta_{wzg} Re\{Z_{RLC}(j\omega)\}$
$f_{G1} = 3,043 \text{ MHz}$	$R_{L1} = 98,70 \Omega$	$Z_{RLC}(j\omega) = (95,50 + 0,5j) \Omega$	3 %
$f_{G3} = 9,850 \text{ MHz}$	$R_{L2} = 9,04 \Omega$	$Z_{RLC}(j\omega) = (9,13 + 0j) \Omega$	1 %

Zbiór  $P^L$  zawiera dwa pobudzenia testowe, oznacza to, że podczas lokalizacji uszkodzenia fizycznie należy wykonać pomiar UT najpierw dla pierwszego pobudzenia testowego a następnie dla drugiego pobudzenia testowego. Podczas fizycznego procesu testowania UT na linii produkcyjnej użycie otrzymanej struktury dwójnika RLC i sygnału multiton pozwala na dwukrotne przyspieszenie procesu lokalizacji uszkodzenia w UT.



Rys. 3-8 Sprzętowa redukcja czasu testu w metodzie testowania 4-tBT.

Mimo ewidentnej zalety zaproponowanej sprzętowej metody redukcji czasu testu w metodzie 4-tBT, można wymienić też kilka wad, tj. problemów inżynierskich związanych z wytworzeniem odpowiedniej struktury oraz z pomiarem parametrów odpowiedzi układu.



Rys. 3-9 Znaleziona struktura dwójnika pasywnego RLC.

Wyniki przeprowadzanych badań potwierdzają słuszność trzeciej tezy cząstkowej:

**Zastosowanie syntezy impedancji dwójnika RLC do wyznaczania wartości elementów struktury dołączonej do testowanego układu przyspiesza proces fizycznego testowania układu na linii produkcyjnej.**

## 4 Wybrane przykłady obliczeniowe

Układ dopasowania impedancyjnego (rys. 3-5a) jest stosunkowo prostym pasywnym układem liniowym, który doskonale obrazuje zalety metody testowania 4-tBT [Kyz08], [Kyz08c]. Układ posiada skończoną impedancję wejściową i niezerową impedancję wyjściową.

Tabela 4-1 Wartości przedziałów przestrzeni poszukiwań dla UDI.

Element pobudzenia testowego $T_a$	Przedziały wartości elementów pobudzenia testowego $T_a$		
	Wartość odniesienia	Min	Max
Częstotliwość generatora $f_G$	13,56 MHz	2,23MHz	20,22 MHz
Rezystancja obciążenia $R_L$	50 $\Omega$	0,1 $\Omega$	4 k $\Omega$
Reaktancja obciążenia $X_L$	0 $\Omega$	-10 k $\Omega$	10 k $\Omega$
Rezystancja generatora $R_G$	4 $\Omega$	0,1 $\Omega$	40 $\Omega$
Reaktancja generatora $X_G$	0 $\Omega$	-40 $\Omega$	40 $\Omega$
Rezystancja pętli sprzężenia $R_S$	$\infty$	0,1 $\Omega$	50 k $\Omega$
Reaktancja pętli sprzężenia $X_S$	$\infty$	-20 k $\Omega$	100 $\Omega$

Do dalszych rozważań przyjęto następujące założenia:

- 1) uszkodzenia parametryczne dla wszystkich elementów układu (wartości: a = 15 %, b = 50 %, rys. 3-5c), liczba stanów UT jest równa 11 (tabela 4-1), tolerancja elementów układu  $tol_C = tol_L = 5$  %, liczba analiz Monte Carlo jest równa  $N_{MC} = 80$ , mierzone wartości to napięcie V i faza VP z dostępnych pomiarowo węzłów testowych.
- 2) wymiar przestrzeni poszukiwań  $\mathcal{R}^S$  zawiera się między 2 a 7. Obszar przestrzeni poszukiwań  $\mathcal{R}^S$  (przedziały wartości elementów pobudzenia testowego  $T_a$ , tabela 4-1) ustalony został na podstawie wartości współczynników macierzy admitancyjnej UDI.

W tabeli 4-2 zostały zebrane wyniki symulacji testowanego układu dla TTM oraz dla wybranych wariantów metody 4-tBT. Wyniki przedstawiają informację diagnostyczną (liczba ZN  $N_Y$ , liczba rozkładów testowych  $N_R$ ) znalezioną w drugim etapie metody 4-tBT oraz uzyskane poziomy detekcji i lokalizacji uszkodzenia testowanego układu (stany UT jednoznacznie zlokalizowane).

W oparciu o przedstawione wyniki można stwierdzić, że metoda 4-tBT pozwala na uzyskanie lepszych rezultatów niż metoda TTM. W przypadku tradycyjnej metody testowania nie jest możliwa jednoznaczna detekcja ani lokalizacja uszkodzenia w testowanym układzie. W przypadku metody 4-tBT z siedmiowymiarową PP możliwa jest zarówno jednoznaczna detekcja jak i lokalizacja uszkodzenia. Dodatkowo, możliwa jest jednoznaczna częściowa identyfikacja, przez podanie kierunku zmiany parametru UT.

Tabela 4-2 Rezultaty symulacji UDI dla różnych wariantów metody 4-tBT.

Wymiar przestrzeni poszukiwań $\mathbb{R}^S$		Wyniki symulacji			
$D$	$T_a = \{T_1, T_2, \dots, T_{N_e}\}$	$N_Y$	$N_R$	Węzły testowe	Stany UT jednoznacznie identyfikowane
1	$f_G$ (TTM)	7	4	1, 2	-
	$R_L$	0	0	1, 2	-
2	$f_G, R_L$	40	24	1, 2	$S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$
	$f_G, X_L$	23	14	1, 2	$S_1, S_2, S_4, S_5, S_{10}$
	$f_G, X_S$	26	16	1, 2	$S_1, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_{10}$
	$R_L, R_G$	17	9	1, 2	$S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9$
3	$f_G, R_L, X_L$	28	16	1, 2, 4	$S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_8, S_{10}$
	$f_G, R_L, R_S$	43	26	1, 2	$S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$
	$f_G, R_L, X_S$	39	24	1, 2	$S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$
	$f_G, R_L, R_G$	42	26	1, 2	$S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$
	$f_G, X_L, R_G$	46	29	1, 2	$S_1, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$
	$f_G, X_L, X_S$	33	20	1, 2	$S_1, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$
	$f_G, R_G, R_S$	24	14	1, 2	$S_1, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$
	$f_G, R_G, X_S$	24	15	1, 2	$S_1, S_4, S_5, S_{10}$
4	$f_G, R_L, R_G, R_S$	57	36	1, 2	$S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$
	$f_G, R_L, R_G, X_S$	46	29	1, 2	$S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$
	$f_G, X_L, R_G, R_S$	41	25	1, 2	$S_1, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$
	$f_G, R_L, X_L, R_S$	26	15	1, 2, 4	$S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_8, S_{10}$
	$f_G, R_L, R_S, X_S$	40	25	1, 2, 5	$S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$
	$f_G, X_L, R_S, X_S$	43	27	1, 2, 5	$S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$
	$f_G, R_G, R_S, X_S$	24	14	1, 2, 5	$S_1, S_3, S_4, S_5, S_6, S_8, S_{10}$
	$f_G, R_L, X_L, R_G, X_S$	56	28	1, 2, 4	$S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$
	$f_G, R_L, R_G, R_S, X_S$	56	41	1, 2, 5	$S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$
	$R_L, X_L, R_G, X_G, R_S$	18	10	1, 2, 3, 4	$S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9$
6	$f_G, R_L, X_L, R_G, X_G, R_S$	44	27	1, 2, 3, 4	$S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$
	$f_G, R_L, X_L, R_G, X_G, X_S$	44	27	1, 2, 3, 4	$S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$
7	$f_G, R_L, X_L, R_G, X_G, R_S, X_S$	51	31	1, 2, 3, 4, 5	$S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$

Wyniki przeprowadzonych badań dla przykładu obliczeniowego układu dopasowania impedancyjnego potwierdzają słuszność pierwszej tezy cząstkowej:

**Wykorzystanie heurystycznych algorytmów zbiorowej inteligencji umożliwia wyszukanie informacji diagnostycznej w wielowymiarowej przestrzeni poszukiwań.**



## 5 Podsumowanie i wnioski

Rozwój metod testowania uszkodzeń jest jednym z ważniejszych obszarów badań w zakresie testowania, diagnostyki układów analogowych i mieszanych (analogowo-cyfrowych). Przez termin rozwój metod testowania, rozumiane są zagadnienia zarówno polepszenia jakości testu (separowalności stanów UT) jak i redukcji czasu testu. Zaproponowana przez Autora metoda 4-tBT wpisuje się w wymienione wyżej nurty rozwoju metod testowania uszkodzeń FDT.

Metodę 4-tBT Autor podzielił na cztery etapy. W drugim, trzecim i czwartym etapie metody 4-tBT zostały zidentyfikowane i opisane problemy optymalizacyjne NP-trudne. Dla każdego z opisanych problemów optymalizacyjnych została zaproponowana odpowiednia metoda rozwiązania, która pozwoliła na znalezienie „dobrego” lub nawet optymalnego rozwiązania w czasie akceptowalnym przez inżyniera projektanta.

Skuteczność zaproponowanej czwórnikowej metody testowania została sprawdzona dla trzech analogowych układów elektronicznych z ograniczonym dostępem pomiarowym. Biorąc pod uwagę wyniki uzyskane z przykładów obliczeniowych, można stwierdzić, że:

1. Zaletą metody 4-tBT jest zwiększenie informacji diagnostycznej za sprawą pojawienia się nowych węzłów testowych w dołączonym czwórniku testującym. Większa liczba informacji diagnostycznej ma bezpośrednie przełożenie na polepszenie separowalności uszkodzeń (zwiększenie poziomu detekcji i lokalizacji uszkodzenia). Z drugiej jednak strony, większa liczba informacji diagnostycznej obarczona jest rozleglejszym obszarem przestrzeni poszukiwań, dlatego też, znalezienie efektywnego sposobu wyszukania informacji diagnostycznej z wielowymiarowego obszaru przestrzeni poszukiwań  $\mathbb{R}^S$  ma tak duże znaczenie. Zaproponowana, heurystyczna metoda wyszukania informacji diagnostycznej przy użyciu procesu optymalizacji miary  $S_{d,Y_i}$  zbiorów niejednoznaczności, pozwala na efektywne przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań w skończonym czasie. Sam proces przeszukiwania przestrzeni rozwiązań przy użyciu algorytmu heurystycznego PSO jest nietypowy, dlatego też został on przedstawiony graficznie.

Wyniki przeprowadzanych badań (w szczególności dla przykładu obliczeniowego układu dopasowania impedancyjnego) potwierdzają słuszność pierwszej tezy częściowej:

**Wykorzystanie heurystycznych algorytmów zbiorowej inteligencji umożliwia wyszukanie informacji diagnostycznej w wielowymiarowej przestrzeni poszukiwań.**

2. Dedykowana metoda optymalizacji doboru punktów testowych pozwala na znalezienie minimalnego zbioru punktów testowych  $P^D$  i  $P^L$ . Na etapie potestowym skutkuje to tym, że wskazanie stanu obwodu będzie się mogło odbyć w możliwie najszybszy sposób. Zagadnienie optymalizacji doboru punktów testowych należy do rodziny problemów optymalizacyjnych

kombinatorycznych NP-trudnych. Dla przykładów układów testowych z dużą liczbą informacji diagnostycznej, optymalizacja doboru punktów testowych stanowi poważny problem obliczeniowy.

Zaletą zaproponowanej dedykowanej metody optymalizacji doboru punktów testowych jest to, że umożliwia znalezienie minimalnego zbioru punktów testowych (zalety tej nie posiadają inne metody znane z literatury). Skuteczność zaproponowanej metody optymalizacji doboru punktów testowych sprawdzono na odpowiednim przykładzie obliczeniowym (filtr), dla którego uzyskano dużą liczbę informacji diagnostycznej. Otrzymane wyniki (zbiory punktów testowych) porównano z wynikami uzyskanymi dla innych metod optymalizacji doboru punktów testowych (metoda z użyciem koncepcji kanału informacyjnego z zakłóceniami, metoda dołączania). Wynik porównania jednoznacznie wskazuje wyższość zaproponowanej metody nad innymi metodami opisanymi w literaturze.

Wyniki przeprowadzanych badań (w szczególności układu filtru) potwierdzają słuszność drugiej tezy cząstkowej:

**Wykorzystanie dedykowanej metody optymalizacji doboru punktów testowych pozwala na wyszukanie minimalnego zbioru punktów testowych.**

3. Czwarty etap metody 4-tBT dąży do redukcji czasu testu wykorzystując zagadnienia z dziedziny elektrotechniki i przetwarzania sygnałów. W odróżnieniu od etapu trzeciego metody 4-tBT, gdzie redukcja czasu testu polega na minimalizacji liczby punktów testowych, etap czwarty można utożsamić z częścią sprzętową, związaną z budową testera. Zaproponowana sprzętowa metoda redukcji czasu testu wykorzystuje technikę multiton (znaną z metody testowania TTM) oraz syntezę impedancji dwójnika pasywnego RLC. Pomimo pewnych utrudnień związanych m.in. z otrzymaniem struktury dwójnika pasywnego RLC realizującego zadane wartości impedancji z wektorów pobudzeń testowych (dla punktów testowych) oraz ze znacznym skomplikowaniem budowy testera, zaproponowana technika w znaczny sposób przyspiesza fizyczny proces testowania.

Wyniki przeprowadzanych badań potwierdzają słuszność trzeciej tezy cząstkowej:

**Zastosowanie syntezy impedancji dwójnika RLC do wyznaczania wartości elementów struktury dołączonej do testowanego układu przyspiesza proces fizycznego testowania układu na linii produkcyjnej.**

Oprócz wymienionych w tezach cząstkowych dokonań, za najistotniejsze Autor uważa:

- a) utworzenie systematyki testowania uwzględniająca metodę testowania 4-tBT,
- b) zaproponowanie miary  $S_{d,Y_i}$  jako sposobu oceny jakości zbiorów niejednoznaczności i punktów testowych,

- c) zaproponowanie sposobu wizualizacji informacji diagnostycznej,
- d) zdefiniowanie problemu dyskretyzacji przestrzeni poszukiwań  $\mathbb{R}^S$ .

Wyniki przeprowadzonych badań oraz wykazanie słuszności postawionych tez cząstkowych pozwalają stwierdzić słuszność tezy głównej pracy:

**Użycie wielowymiarowej przestrzeni poszukiwań zwiększa liczbę dostępnych pomiarowo węzłów testowych oraz poprawia skuteczność diagnostyki analogowych układów elektronicznych.**

W związku z powyższym można stwierdzić, że osiągnięto cel pracy, jakim było:

**Opracowanie metody testowania analogowych układów elektronicznych z ograniczonym dostępem pomiarowym, która wykorzystuje wielowymiarową przestrzeń poszukiwań.**

Opracowana przez Autora metoda testowania 4-tBT ma duży potencjał aplikacyjny (zgłoszenie patentowe nr P 388434), a także rozwojowych. W wyniku przeprowadzonych prac Autor dostrzega następujące kierunki dalszych badań, które obejmują:

- a) wykorzystania analizy wrażliwościowej UT do wyznaczania granic zbiorów niejednoznaczności,
- b) wyznaczania wartości elementów dołączonego czwórnika testującego w sposób analityczny,
- c) badania układów elektronicznych dla metody 4-tBT z pobudzeniem aperiodycznym (problem wyboru kształtu pobudzenia, dołączenia do testowanego układu odpowiednich elementów),
- d) użycia metody 4-tBT do testowania układów nieliniowych (pomiar poziomów sygnałów harmoniczných dla odpowiedzi UT),
- e) rozszerzenia metody czwórnikowej testowania o inne możliwości połączenia czwórnika testującego i UT, tj. w sposób szeregowy, łańcuchowy, szeregowo-równoległy, itp.,
- f) rozszerzenia metody czwórnikowej testowania 4-tBT na bardziej ogólną, tj. wielobiegunnikową metodę testowania N-tBT (ang. N-terminal Based Test),
- g) rozszerzenia metody czwórnikowej testowania na bardziej ogólną, tj. modyfikowanie struktury wewnętrznej testowanego układu i dołączanie zewnętrznych elementów,

## Bibliografia

- [Arabi95] Arabi K., Kaminska B., „Oscillation-based test strategy (OBST) for analog and mixed-signal circuits”, U.S. Patent Appl., Oct. 1995
- [Bake96] Baker K., Richardson A. M., Dorey A. P., *Mixed signal test techniques, applications and demands*, IEEE Circuits, Devices, Systems, 1996, vol. 146, str. 358-365.
- [Bali96] Balivada A., Chen J., Abraham J. A., *Analog testing with time response parameters*, IEEE Design and Test of Computers, 1996, vol. 13, str. 18-25.
- [Chatt01] Chatterjee A., *Test generation based diagnosis of device parameters for analog circuits*, Design, Automation and Test in Europe, 2001, pp. 596 – 602.
- [Gold03] Goldberg D. E., „Algorytmy genetyczne i ich zastosowania”, WNT 2003.
- [Golo07a] Golonek T., Grzechca D., Rutkowski J., *Evolutionary System for Analog Test Frequencies Selection with Fuzzy Initialization*, IEEE DDECS, 2007, Kraków, str. 353-356.
- [Golo07b] Golonek T., Fedrizzi Sz., Grzechca D., „Ewolucyjny projektant filtrów (Evolutionary technique for analog filters design)”, Miesięcznik naukowo techniczny SEP "Elektronika", nr 11/2007, Wydawnictwo SIGMA-NOT, ISSN 0033-2089, str. 58-61.
- [Huer93] Huertas J. L., *Test and design for testability of analog and mixed-signal IC: theoretical basic and pragmatical approaches*, European Conference on Circuit Theory and Design, Davos, Szwajcaria, 1993, str. 75-156
- [Ken01] Kennedy J., Eberhart R., „Swarm Intelligence”, Morgan Kaufman Publishers, 2001.
- [Kyz08] Kyzioł P., Grzechca D., Jantos P., Rutkowski J., *Dopasowanie impedancyjne w systemach radiowej identyfikacji RFID na przykładzie układu TRF7960 firmy Texas Instruments*, VII Krajowa Konferencja Elektroniki, KKE 2008, Darłówko, Polska, pp. 305-310.
- [Kyz08b] Kyzioł P., Grzechca D., Golonek T., Rutkowski J., *The Use of Variable Load for RF Circuit Testing*, 2008 International Conference on Signals and Electronic Systems, ICSES 2008, Kraków, Poland, pp. 557-560.
- [Kyz08c] Kyzioł P., Grzechca D., Jantos P., Rutkowski J., „Dopasowanie impedancyjne w systemach radiowej identyfikacji RFID na przykładzie układu TRF7960 firmy Texas Instruments”, "Elektronika", nr 11/2008, ISSN 0033-2089, str. 155-158.
- [Kyz09] Kyzioł P., Grzechca D., Golonek T., Rutkowski J., *Classification of Analog Circuit States Using PSO in Multidimensional Space of Solutions*, Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, MIXDES 2009, Łódź, Poland, pp. 513-518.
- [Kyz09a] Kyzioł P., Grzechca D., Rutkowski J., *Wykorzystanie algorytmu PSO (Particle Swarm Optimization) w diagnostyce analogowych układów elektronicznych*, VIII Krajowa Konferencja Elektroniki, KKE 2009, Darłówko, Polska, str. 62.
- [Kyz09b] Kyzioł P., Grzechca D., Rutkowski J., „Tester do diagnostyki analogowych układów elektronicznych”, PL Zgłoszenie patentowe nr P 388434, July 2009, Poland.

- [Kyz09c] Kyzioł P., Grzechca D., Rutkowski J., *Multidimensional Search Space for Catastrophic Faults Diagnosis in Analog Electronic Circuits*, IEEE European Conference on Circuit Theory and Design, ECCTD 2009, Antalya, Turkey, pp. 555-558.
- [Kyz09d] Kyzioł P., Rutkowski J. Grzechca D., „Wykorzystanie algorytmu PSO w diagnostyce analogowych układów elektronicznych”, Miesięcznik naukowo techniczny SEP "Elektronika", nr 10/2009, ISSN 0033-2089, pp. 57-59.
- [Kyz10] Kyzioł P., Rutkowski J. Grzechca D., *Testing Analog Electronic Circuits using N-terminal Network*, IEEE International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems , DDECS 2010, Wien, Austria, pp. 177-180.
- [Kyz10a] Kyzioł P., Grzechca D., Golonek T., Rutkowski J., *Synteza impedancji dwójnika pasywnego RLC z wykorzystaniem algorytmu programowania genetycznego*, IX Krajowa Konferencja Elektroniki, KKE 2010, Darłówko, Polska, str. 145-150.
- [Kyz10b] Kyzioł P., Grzechca D., Rutkowski J., „Multidimensional search space in testing and diagnosis of analogue electronic circuits”, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), nr 11a/2010, ISSN 0033-2097, R.86 pp. 251-255.
- [Kyz10c] Kyzioł P., Rutkowski J., *Searching Groups and Layouts in N-terminal Based Test Method using Heuristic PSO Algorithm*, 2010 International Conference on Signals and Electronic Systems, ICSES 2010, Gliwice, Poland, pp. 217-220.
- [Mich96] Michalewicz Z., „Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne”, WNT 1996.
- [Miko84] Mikołajuk K., Trzaska Z., „Elektrotechnika Teoretyczna”, PWN, 1984.
- [Milo94] Milor L., Sangiovanni-Vincentelli A. L., *Minimizing production test time to detect faults in analog circuits*, IEEE CAD of Integrated CAS, 1994, vol. 13, str. 796-813.
- [Milo98] Milor L., *A Tutorial Introduction to Research on Analog and Mixed-Signal Circuit Testing*, IEEE Trans. On Cir. And Syst.-II, Analog and Dig. Sig. Proces., Vol.45, No.10 1998, pp. 1389-1407.
- [Rut02] Rutkowski J., Puchalski B., *Optimum test selection for analog circuits with the use of information channel concept*, Proc. ICSES, Świeradów Zdrój 2002, pp. 325-330.
- [Rut03] Rutkowski J., „Słownikowe metody diagnostyczne”, WKŁ 2003.
- [Star04] Starzyk J., Liu D., Liu Z., Nelson D., Rutkowski J., *Entropy-Based optimum Test Point Selection for Analog Fault Dictionary Techniques*, June 2004, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 53, no 3, pp.754-761.
- [Tad02] Tadeusiewicz M., Hałgas S., *An algorithm for soft-fault diagnosis of linear and nonlinear circuits*, IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, Vol.49, No.11, November 2002, pp.1648-1653.
- [Tocz09] Toczek W., „Strategie testowania i diagnostyki analogowych układów elektronicznych”, monografia, Politechnika Gdańska 2009.