

Zbigniew CZAJA

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI,
KATEDRA OPTOELEKTRONIKI I SYSTEMÓW ELEKTRONICZNYCH

Lokalizacja uszkodzeń w częściach analogowych wbudowanych systemów elektronicznych z uwzględnieniem tolerancji elementów

Dr inż. Zbigniew CZAJA

Ukończył Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej w 1995 roku. Stopień doktora uzyskał w 2001 roku. Jest adiunktem w Katedrze Optoelektroniki i Systemów Elektronicznych. Autor lub współautor ok. 35 publikacji z zakresu diagnostyki elektronicznej. Główne zainteresowania dotyczą diagnostyki analogowych układów elektronicznych, w szczególności będących składowymi wbudowanych mieszanych-sygnałowo systemów elektronicznych.



e-mail: zbczaja@pg.gda.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono nową metodę detekcji i lokalizacji uszkodzeń parametrycznych elementów pasywnych w częściach analogowych elektronicznych systemów wbudowanych sterowanych mikrokontrolerami. Metoda pozwala na detekcję i lokalizację uszkodzeń w układach z tolerancjami. W części pomiarowej metody badany układ pobudzany jest impulsem prostokątnym generowanym przez mikrokontroler, a jego odpowiedź jest próbkowana przez wewnętrzny przetwornik A/C mikrokontrolera. Następnie mikrokontroler wykonuje detekcję i lokalizację uszkodzeń opierając się na algorytmie bazującym na słowniku uszkodzeń, wygenerowanym na podstawie rodziny pasów lokalizacyjnych opisującej właściwości układu badanego.

Słowa kluczowe: detekcja i lokalizacja uszkodzeń, samo-testowanie, BIST, elektroniczne systemy wbudowane, mikrokontrolery

Fault localization in analog parts of embedded electronic systems taking into account tolerances of elements

Abstract

In the paper the new method of soft fault detection and localisation of passive elements in analog parts of electronic embedded systems controlled by microcontrollers is presented. The method enables to detect and to localize faults in circuits with tolerances. In the measurement part of the method the tested circuit is stimulated by a square impulse generated by the microcontroller, and its response is sampled by the internal ADC of the microcontroller. Next, the microcontroller realizes the fault detection and localisation according to the algorithm, which bases on the fault dictionary. The fault dictionary was generated from the family of localisation belts, which describes proprieties of the tested circuit.

Keywords: fault detection and localization, self-testing, BIST, electronic embedded system, microcontrollers

1. Wprowadzenie

Obecnie elektroniczne systemy wbudowane zdominowały już rynki: motoryzacyjny, lotniczy, telekomunikacyjny, multimedialny, sprzętu AGD, medyczny, automatyki przemysłowej, itp. Ponad 99% produkowanych na świecie procesorów jest przeznaczonych dla systemów wbudowanych.

Systemy te często zawierają czujniki lub podukłady generujące sygnały analogowe. Zatem składają się one nie tylko z części cyfrowej (procesor sygnałowy, mikrokontroler, czy układ programowalny) używanej do sterowania i przetwarzania danych, ale również z części analogowej, której głównym zadaniem jest

kondycjonowanie sygnałów analogowych zazwyczaj podawanych dalej przetworzeniu na postać cyfrową.

Stąd jest bardzo ważne, aby część analogowa pracowała poprawnie i nie wprowadzała błędów do przetwarzanych przez nią sygnałów, ponieważ błędny sygnał wpływa na niepoprawną decyzję jednostki sterującej, co w skrajnych sytuacjach może doprowadzić nawet do uszkodzenia sterowanego urządzenia.

Zazwyczaj proste systemy wbudowane sterowane są mikrokontrolerami. Nowoczesne mikrokontrolery zawierają w sobie bogaty zestaw urządzeń peryferyjnych, takich jak liczniki/timery, generatory PWM, przetworniki A/C, komparatory analogowe i interfejsy szeregowo (UART, SPI, I²C, USB, CAN, Ethernet).

Stąd jak wykazano w [1,2] można wykorzystać wewnętrzne zasoby mikrokontrolerów do budowy mikrosystemów pomiarowych (układów BIST) pozwalających na detekcję i lokalizację uszkodzeń części analogowych systemów wbudowanych. Zaproponowane podejście bazuje wyłącznie na zasobach wewnętrznych i mocy obliczeniowej mikrokontrolerów sterujących systemami wbudowanymi. Zasoby te są używane tylko na czas testowania lub samo-testowania systemu. Poza tym czasem pełnią one funkcje określone przez program sterujący systemem wbudowanym. Zatem główną zaletą zaproponowanego podejścia jest brak rozbudowy systemu o dodatkowe elementy wykorzystywane do testowania części analogowej.

Podejście to bazuje na metodzie detekcji i lokalizacji pojedynczych uszkodzeń parametrycznych elementów pasywnych układów analogowych opartej na krzywych identyfikacyjnych [2]. W metodzie zakłada się przypadek idealny, w którym elementy układu badanego nie posiadają tolerancji.

W praktyce wszystkie elementy obciążone są tolerancją. Zatem nowością niniejszego artykułu jest modyfikacja opracowanej przez autora metody diagnostycznej pozwalająca na detekcję i lokalizację uszkodzeń w układach analogowych z tolerancjami elementów nieuszkodzonych. W tym celu opracowano nowe podejście do tworzenia słownika uszkodzeń (bazujące między innymi na metodzie Monte Carlo) oraz nowe procedury detekcji i lokalizacji uszkodzeń uwzględniające niewielkie moce obliczeniowe prostych 8-bitowych mikrokontrolerów.

2. Opis metody diagnostycznej

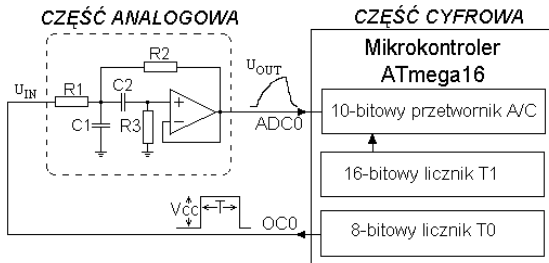
Metoda diagnostyczna składa się z trzech części:

- przed-testowej – tworzenia słownika uszkodzeń,
- pomiarowej – pobudzenie układu badanego impulsem prostokątnym o programowanym czasie trwania wygenerowanym przez mikrokontroler i pomiarze K próbek u_1, u_2, \dots, u_K napięcia odpowiedzi czasowej tego układu na ten impuls przez wewnętrzny przetwornik A/C w ściśle określonych momentach t_1, t_2, \dots, t_K ustalonych przez wewnętrzny licznik mikrokontrolera [1,2],
- diagnostycznej – detekcji i lokalizacji uszkodzeń realizowanych przez mikrokontroler w oparciu o wyniki pomiarowe, słownik uszkodzeń i procedury diagnostyczne zawarte w jego pamięci programu.

Pierwszy etap jest wykonywany tylko raz podczas projektowania systemu. Pozostałe dwa są realizowane przez mikrokontroler w czasie procedury samo-testowania systemu.

3. Słownik uszkodzeń

Słownik uszkodzeń jest zbiorem danych opisujących rodzinę pasów lokalizacyjnych powstałych przez rozmycie krzywych identyfikacyjnych w wyniku uwzględnienia tolerancji elementów nieuszkodzonych. Natomiast krzywe identyfikacyjne zobrazowują zachowanie się układu badanego (rys. 1) pod wpływem zmian wartości jego elementów pasywnych [2].



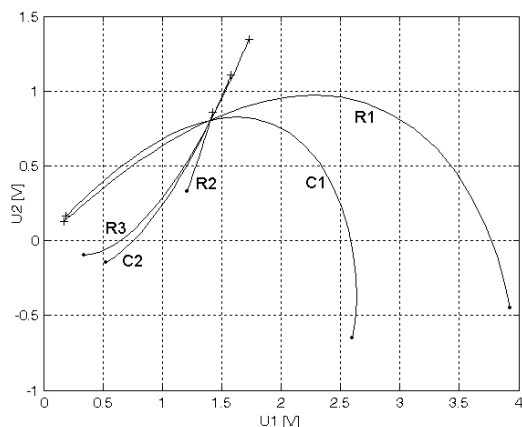
Rys. 1. Elektroniczny system wbudowany z testowaną częścią analogową, gdzie $R1 = R2 = 5,1k\Omega$, $R3 = 10k\Omega$, $C1 = C2 = 180nF$
 Fig. 1. The electronic embedded system with the tested analog part, where $R1 = R2 = 5.1k\Omega$, $R3 = 10k\Omega$, $C1 = C2 = 180nF$

Krzywe identyfikacyjne wykreślone są w przestrzeni wyników pomiarów odpowiedzi układu [1,2]. Typ tej przestrzeni zależy od sposobu pobudzenia układu badanego, jak i metody pomiaru odpowiedzi tego układu na pobudzenie.

W prezentowanej metodzie diagnostycznej układ pobudzany jest impulsem prostokątnym o czasie trwania T i amplitudzie równej V_{CC} . Wynikiem pomiarowym jest zbiór K próbek napięcia odpowiedzi układu $\{u_k^{res}\}_{k=1,\dots,K}$ mierzonych w K ściśle określonych momentach jej trwania [2].

W tym przypadku sposób tworzenia krzywych identyfikacyjnych zawartych w przestrzeni wyników pomiarów odpowiedzi układu jest następujący [1,2].

Przyjmując, iż pierwsza próbka napięcia odpowiedzi układu badanego na impuls prostokątny u_1 mierzona w momencie t_1 jest pierwszą współrzędną, druga próbka u_2 mierzona w chwili t_2 drugą, itd. uzyskujemy przestrzeń K -wymiarową wyników pomiarów. Zmieniając wartość p_i i -tego elementu układu, w zakresie od 0,1 do 10 $p_{i,nom}$ ($p_{i,nom}$ - wartość nominalna i -tego elementu) przy pozostałych elementach posiadających wartości nominalne i symulując odpowiedź układu na tę zmianę wykreślamy i -tą krzywą identyfikacyjną w tej przestrzeni. Wykonując tę czynność I razy uzyskujemy rodzinę krzywych identyfikacyjnych układu badanego. Na rys. 2 pokazano rodzinę krzywych układu badanego dla $K=2$ (metoda 2-D).

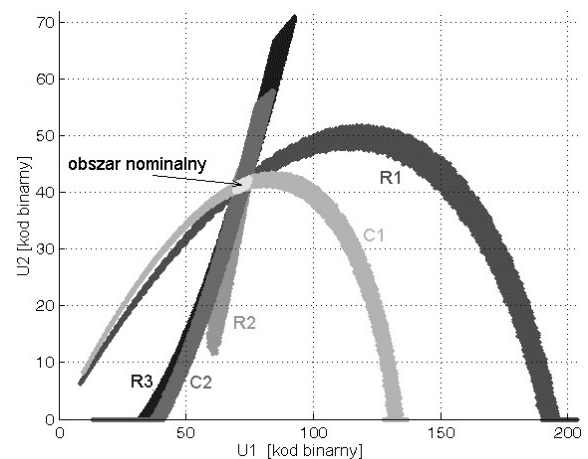


Rys. 2. Mapa krzywych identyfikacyjnych układu (rys. 1) dla metody 2D ($K=2$) dla $t_1 = 406\mu s$ i $t_2 = 610\mu s$
 Fig. 2. Map of identification curves for the circuit (Fig. 1) for the 2-D method ($K=2$) for $t_1 = 406\mu s$ and $t_2 = 610\mu s$

W praktyce wszystkie elementy posiadają tolerancje. Zatem uwzględniając tolerancje elementów nieuszkodzonych krzywe identyfikacyjne rozmywają się tworząc pasy lokalizacyjne (rys. 3).

W trakcie samo-testowania systemu pomiary próbek napięcia odpowiedzi układu badanego są dokonywane przez wewnętrzny 10-bitowy przetwornik A/C mikrokontrolera (o całkowitym błędzie przetwarzania 1,5 LSB) [3]. Zatem przyjęto, iż wynik pomiaru ma postać 8-bitowej liczby binarnej (ustawione justowanie rezultatu konwersji w lewo). Ponadto zakres pomiarowy przetwornika mieści się w przedziale od 0V do napięcia zasilania $V_{CC} = 5V$ części cyfrowej.

Stąd przy tworzeniu rodziny pasów lokalizacyjnych wartości napięć podano w postaci kodu binarnego zgodnego z wynikiem konwersji zawartym w rejestrze danych przetwornika A/C. Dzięki czemu wyniki konwersji mogą być bezpośrednio porównywane ze słownikiem uszkodzeń. Natomiast zakres zmian odpowiedzi układu ograniczono do przedziału napięć mierzonych przez wewnętrzny przetwornik A/C mikrokontrolera. Na rys. 3 pokazano wykreślone przy tych założeniach rodzinę pasów lokalizacyjnych metodą Monte Carlo przy uwzględnieniu 1% tolerancji rezystancji i 5% tolerancji pojemności.



Rys. 3. Rodzina pasów lokalizacyjnych testowanego toru analogowego (rys. 1) wykorzystywana do tworzenia słownika uszkodzeń
 Fig. 3. The family of localisation belts of the tested analog part (Fig. 1) used to creation of the fault dictionary

Z rys. 3 widać, iż słownik uszkodzeń musi zawierać opisy obszaru nominalnego oraz każdego z pasów lokalizacyjnych.

Obszar nominalny reprezentuje stan nominalny układu, w którym wartości wszystkich elementów nie przekraczają przyjętych tolerancji. Zatem w pierwszym kroku diagnostyki uszkodzeń należy sprawdzić czy wynik pomiaru zawiera się w obszarze nominalnym. Jak tak to układ jest nieuszkodzony – detekcja uszkodzenia.

Każdy z pasów reprezentuje dewiacje wartości poszczególnych elementów. Jeżeli rezultat pomiaru naniesiony na płaszczyznę wyników pomiarów znajduje się wewnątrz i -tego pasa lokalizacyjnego to oznacza, iż uszkodzony jest i -ty element – lokalizacja uszkodzenia.

Stąd tworzenie słownika uszkodzeń zostało podzielone na dwa etapy. W pierwszym etapie generowane są dane opisujące obszar nominalny, a w drugim dane reprezentujące poszczególne pasy lokalizacyjne.

3.1. Generacja opisu obszaru nominalnego

Zdecydowano się na aproksymację obszaru nominalnego elipsą, gdyż zdecydowanie dokładniej go aproksymuje niż okrąg, a ponadto jest opisana tylko współrzędnymi swoich ognisk i długością wielkiej osi (jednym punktem więcej niż okrąg). Do

analizy wybrano definicję elipsy idealnie nadającą się do wykorzystania w algorytmie detekcji uszkodzeń. Definiuje ona elipsę jako zbiór punktów, których suma odległości od dwóch punktów F_1, F_2 zwanych ogniskami elipsy jest równa długości wielkiej osi $2a$.



Rys. 4. Obszar nominalny wraz z jego elipsą aproksymacyjną
Fig. 4. The nominal area with its approximation ellipse

Szukanie parametrów elipsy aproksymującej (rys. 4) przebiega według następującego algorytmu:

- Metodą Monte Carlo generowane jest M punktów o współrzędnych (u_1^m, u_2^m) reprezentujących obszar nominalny, gdzie $m=1, \dots, M$.
- Na podstawie tych punktów wyznaczone są współczynniki A i B prostej aproksymacyjnej $u_2 = Au_1 + B$, obszar nominalny przechodzącej przez punkt nominalny P_{nom} (funkcja *polyfit* pakietu Matlab).
- Następnie obliczany jest kąt nachylenia prostej aproksymacyjnej – jednocześnie kąta nachylenia elipsy $\varphi = \arctg(A)$.
- W kolejnym kroku układ współrzędnych U_1 - U_2 jest obracany o kąt $-\varphi$ i przesuwany o wektor $[-u_1^{nom}, -u_2^{nom}]$, gdzie: u_1^{nom}, u_2^{nom} – współrzędne punktu nominalnego (środka elipsy). Uzyskujemy w ten sposób zbiór punktów (u_1^{m*}, u_2^{m*}) , który będzie aproksymowany elipsą o środku $(0, 0)$ i ogniskach znajdujących się na osi odciętych, dzięki czemu możemy stosować podstawowe wzory na obliczanie elipsy.
- Długości osi wielkiej a i osi małej b wyliczamy z zależności:

$$a = \left(\max_{m^*=1, \dots, M} \{u_1^{m*}\} - \min_{m^*=1, \dots, M} \{u_1^{m*}\} \right) / 2 \quad (1a)$$

$$b = \left(\max_{m^*=1, \dots, M} \{u_2^{m*}\} - \min_{m^*=1, \dots, M} \{u_2^{m*}\} \right) / 2 \quad (1b)$$

- Na ich podstawie obliczamy odległość ognisk elipsy od jej środka $c = \sqrt{a^2 - b^2}$.
- Na zakończenie wyznaczamy współrzędne ognisk elipsy $F_1(u_1^{F1}, u_2^{F1})$ i $F_2(u_1^{F2}, u_2^{F2})$ ze wzorów:

$$\begin{aligned} u_1^{F1} &= u_1^{nom} + c \cdot \cos \varphi \\ u_2^{F1} &= u_2^{nom} + c \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} u_1^{F2} &= u_1^{nom} - c \cdot \cos \varphi \\ u_2^{F2} &= u_2^{nom} - c \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (2b)$$

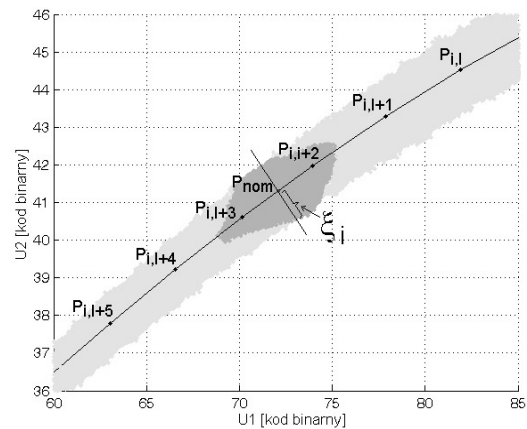
W trakcie detekcji i lokalizacji uszkodzeń obliczenia są wykonywane przez 8-bitowy mikrokontroler o niewielkiej mocy obliczeniowej, stąd w celu ich uproszczenia przyjęto metrykę taksówkową. Zatem parametr $2a$ został zastąpiony równoważnym mu parametrem $e = 2(c + b)$.

Czyli w słowniku uszkodzeń zapamiętywane są w formacie 1-bajtowym następujące parametry elipsy aproksymującej: $u_1^{F1}, u_2^{F1}, u_1^{F2}, u_2^{F2}, e$.

3.2. Tworzenie opisów pasów lokalizacyjnych

Tak jak w pracy [4] założono, iż każdy pas lokalizacyjny będzie aproksymowany przez krzywą identyfikacyjną (dokładniej przez zbiór punktów reprezentujących tą krzywą), z której powstał w wyniku jej rozmycia pod wpływem uwzględnienia tolerancji oraz przez współczynnik przynależności punktu pomiarowego do pasa lokalizacyjnego ξ_i będący połową szerokości fragmentu tego pasa zawartego w obszarze nominalnym (rys. 5).

Każda i -ta krzywa w słowniku uszkodzeń jest przedstawiona za pomocą zbioru współrzędnych L punktów ją aproksymujących (rys. 5). Stąd opis i krzywych zapamiętywany w słowniku uszkodzeń ma postać: $\{(u_1^{i,l}, u_2^{i,l})\}_{l=1, 2, \dots, L}$ $i=1, 2, \dots, t$.



Rys. 5. Pas lokalizacyjny elementu p_i
Fig. 5. The localisation belt of the p_i element

Wyznaczanie współczynnika ξ_i jest realizowane przez algorytm analogiczny do przedstawionego w [5]. Składa się on z następujących kroków:

- Wprowadzenie danych wyznaczonych przez algorytm generacji opisu obszaru nominalnego opisujących elipsę: $a, b, u_1^{nom}, u_2^{nom}, \varphi$.
- Obliczenie współczynnika C_i prostej stycznej $u_2 = C_i u_1 + D_i$ do i -tej krzywej identyfikacyjnej w punkcie nominalnym.
- Obliczenie współczynnika E_i prostej $u_2 = E_i u_1 + F_i$ prostopadłej do tej stycznej $E_i = -1/C_i$.
- Wyznaczenie punktu przecięcia $(u_1^{i,x}, u_2^{i,x})$ krzywej $u_2 = E_i u_1 + F_i$ z elipsą aproksymacyjną na podstawie zależności:

$$\begin{cases} u_1^{i,x} = \frac{a \cdot b}{\sqrt{b^2 + a^2 \cdot E_i^2}} \\ u_2^{i,x} = E_i^2 \cdot u_1^{i,x} \end{cases} \quad (3)$$

- Obliczenie współczynnika ξ_i będącego odległością między punktem $(u_1^{i,x}, u_2^{i,x})$ a środkiem elipsy (u_1^{nom}, u_2^{nom}) :

$$\xi_i = |u_1^{nom} - u_1^{i,x}| + |u_2^{nom} - u_2^{i,x}| \quad (4)$$

Na zakończenie algorytmu do słownika uszkodzeń dodawany jest zbiór współczynników przynależności $\{\xi_i\}_{i=1, 2, \dots, t}$.

Stąd kompletna postać słownika uszkodzeń wykorzystywanego przez algorytmy detekcji i lokalizacji uszkodzeń jest następująca: $\{u_1^{F1}, u_2^{F1}, u_1^{F2}, u_2^{F2}, e, \{(u_1^{i,l}, u_2^{i,l})\}_{l=1, 2, \dots, L}, \xi_i\}_{i=1, 2, \dots, t}$. Zajmuje on w pamięci programu mikrokontrolera $5 + (K \cdot L + 1) \cdot I$ bajtów (w naszym przypadku 650 bajtów dla $L = 64$).

4. Detekcja i lokalizacja uszkodzeń

Po przebadaniu części analogowej mikrokontroler przechodzi do wykonywania algorytmu detekcji i lokalizacji pojedynczych uszkodzeń parametrycznych. Bazując na wyniku pomiarowym (u_1^{ret} , u_2^{res}) i słowniku uszkodzeń dokonuje on najpierw detekcji, a następnie w przypadku stwierdzenia niesprawności układu lokalizacji uszkodzeń. Wynik diagnostyki jest przechowywany w zmiennej bajtowej *result*. Sposób kodowania poszczególnych uszkodzeń pokazano na rys. 6.

Nr bitów		6	5	4	3	2	1
x	x	nom	C2	C1	R3	R2	R1

Rys. 6. Sposób kodowania wyniku diagnostyki uszkodzeń w zmiennej *result*
Fig. 6. The way of coding of fault diagnosis result in the variable *result*

Detekcja uszkodzeń polega na sprawdzeniu czy punkt pomiarowy P_{res} o współrzędnych (u_1^{ret} , u_2^{res}) zawiera się wewnątrz elipsy aproksymacyjnej:

$$|u_1^{F1} - u_1^{res}| + |u_2^{F1} - u_2^{res}| + |u_1^{F2} - u_1^{res}| + |u_2^{F2} - u_2^{res}| \leq e \quad (5)$$

Jeśli nierówność (5) jest spełniona to układ jest nieuszkodzony. Ustawiany jest szósty bit *nom* w zmiennej *result* (rys. 6), po czym następuje zakończenie procedury diagnostycznej.

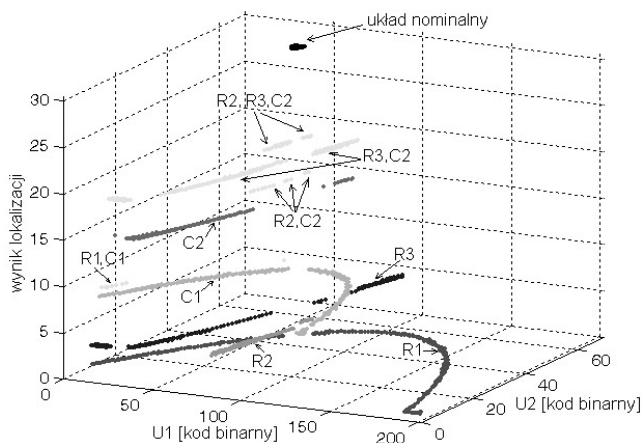
W przeciwnym przypadku mikrokontroler zaczyna wykonywać algorytm lokalizacji uszkodzeń. Dla L krzywych identyfikacyjnych wykonuje on następujące kroki:

- Obliczenie L odległości między punktami aproksymującymi i -tą krzywą a punktem pomiarowym w sposób opisany w [5]:

$$d_{i,l} = |u_1^{res} - u_1^{i,l}| + |u_2^{res} - u_2^{i,l}| \quad (6)$$

- Wyznaczenie odległości między i -tą krzywą a punktem pomiarowym $d_i = \min_{l=1,\dots,L} \{d_{i,l}\}$.
- Sprawdzenie warunku $d_i \leq \xi_i$. Jeśli warunek jest spełniony to w zmiennej *result* ustawiany jest bit reprezentujący uszkodzenie elementu p_i .

Zatem w wyniku działania algorytmu lokalizacji uszkodzeń w zmiennej *result* może być ustawiony jeden bit jednoznacznie wskazujący uszkodzenie jednego z elementów układu badanego, dwa lub trzy bity (w skrajnym przypadku nawet cztery) reprezentujące klastery uszkodzeń lub bit *nom* określający brak uszkodzeń.



Rys. 7. Wyniki badania skuteczności lokalizacji uszkodzeń algorytmu diagnostycznego

Fig. 7. Results of investigation of fault localisation effectiveness of the diagnosis algorithm

Jeżeli algorytm lokalizacji uszkodzeń nie ustawi żadnego bita, oznacza to, iż w układzie badanym występują uszkodzenia wielokrotne.

Wprowadzając punkty pomiarowe do algorytmu detekcji i lokalizacji uszkodzeń, których obie współrzędne zmieniały się w zakresie od 0 do 255, przebadano jego skuteczność. Wyniki badań przedstawiono graficznie na rys. 7.

Z rys. 7 widać, że wyniki lokalizacji odzwierciedlają słownik uszkodzeń (rys. 3). W miejscach, gdzie pasy lokalizacyjne nakładają się nie pozwalając na jednoznaczne wskazanie uszkodzonego elementu algorytm wskazuje na klaster uszkodzeń. Zatem przedstawiona metoda tworzenia i optymalizacji słownika uszkodzeń nadaje się do diagnostyki układów analogowych z tolerancjami elementów nieuszkodzonych.

5. Wnioski

W artykule przedstawiono nowe podejście detekcji i lokalizacji uszkodzeń w układach analogowych z tolerancjami. Bazuje ono na metodzie diagnostycznej pozwalającej na pobudzenie i pomiar odpowiedzi części analogowej systemu wbudowanego, dokonanie detekcji i lokalizacji uszkodzeń parametrycznych elementów pasywnych na podstawie wyniku pomiaru i słownika uszkodzeń opartego na krzywych identyfikacyjnych.

Zaproponowano nowy sposób tworzenia słownika uszkodzeń z pasów lokalizacyjnych reprezentujących wpływ dewiacji elementów na właściwości układu badanego z tolerancjami elementów nieuszkodzonych. Polega on na zastąpieniu obszaru nominalnego opisem elipsy aproksymacyjnej, a pasów lokalizacyjnych współczynnikami odpowiadającymi ich szerokościom i zbiorami punktów aproksymujących poszczególne krzywe identyfikacyjne, z których te pasy powstały przez rozmycie wynikające z uwzględnienia tolerancji.

Miedzy innymi niewielki słownik uszkodzeń i prosty obliczeniowo algorytm diagnostyczny, dają możliwość wykorzystania metody diagnostycznej w praktyce do samostestowania części analogowych mieszanych sygnałowo systemów wbudowanych sterowanych mikrokontrolerami lub mikroprocesorami sygnałowymi.

6. Literatura

- [1] Czaja Z.: About fault diagnosis methods of analog electronic circuits based on the time response to a square impulse and identification curves in multidimensional spaces, Proc. of Join International IMEKO TC1 + TC-7 Symposium, Germany, Ilmenau, 2005, in CD-ROM.
- [2] Czaja Z.: A diagnosis method of analog parts of mixed-signal systems controlled by microcontrollers, Measurement, Vol. 40, Issue 2, February, 2007, pp. 158-170.
- [3] Atmel Corporation: 8-bit AVR microcontroller with 16k Bytes In-System Programmable Flash, ATmega16, ATmega16L, PDF file, 2003.
- [4] Czaja Z.: Testing method of analog parts for mixed signal microsystems based on microcontrollers, Proc. of IMEKO TC-4 Symposium, Athens, Greece, 29th September – 1st October 2004, Vol. 1, pp. 272-277.
- [5] Czaja Z.: Wejściowo-wyjściowa metoda detekcji uszkodzeń w elektronicznych układach analogowych uwzględniająca tolerancje elementów, Proc. of Diagnostics 2004, September 6-9, 2004, Poznań, Poland, vol. 30, t. 1, pp. 119-122.