

Tomasz GARBOLINO, Krzysztof GUCWA, Andrzej HŁAWICZKA

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI,
ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice

Sygnaturowy słownik diagnostyczny o niewielkich rozmiarach wykorzystywany w testowaniu połączeń

Dr inż. Tomasz GARBOLINO

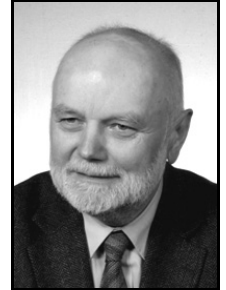
Ukończył studia na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach w 1993 roku. Tam też w 2002 roku obronił pracę doktorską. Obecnie zatrudniony jest jako adiunkt w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej. Jego główne zainteresowania naukowe dotyczą zagadnień związanych z testowaniem oraz projektowaniem układów i systemów cyfrowych.



e-mail: tomasz.garbolino@polsl.pl

Dr hab. inż. Andrzej HŁAWICZKA

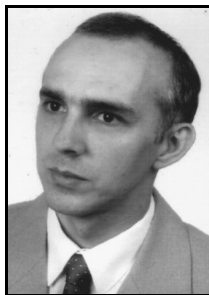
Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Pracę doktorską obronił w 1968 r., habilitacyjną w 1998 r. Pracuje w Politechnice Śląskiej w Instytucie Elektroniki od prawie 30 lat. Jest profesorem tej uczelni. Zajmuje się konsekwentnie rozwojem nowoczesnych metod diagnostyki i testowania złożonych układów i systemów cyfrowych, w szczególności integrowanych na jednej strukturze krzemowej. Opublikował ponad 200 prac i wypromował 3 doktorów nauk technicznych.



e-mail: andrzej.hlawiczka@polsl.pl

Dr inż. Krzysztof GUCWA

Ukończył studia na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach w 1991 roku. Na tymże wydziale obronił pracę doktorską w 2001 roku. Obecnie jest adiunktem w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej. Jego zainteresowania naukowe koncentrują wokół projektowania i testowania układów cyfrowych.



e-mail: krzysztof.gucwa@polsl.pl

Streszczenie

Przedstawiono nowy sposób redukcji rozmiaru sygnaturowego słownika diagnostycznego (SSD) służącego do detekcji i diagnostyki uszkodzeń statycznych i opóźnieniowych w połączeniach. Testowana magistrala złożona z n linii jest dzielona na b k -bitowych fragmentów. Każdy z ww. fragmentów magistrali jest testowany przy użyciu oddzielnego $2k$ -bitowego rejestru pierścieniowego R-LFSR. Procedura testująca obejmuje cztery fazy, w których na przemian pracują parzyste oraz nieparzyste rejestry. Zaproponowane tutaj rozwiązanie pozwala znacznie zmniejszyć wielkość SSD.

Słowa kluczowe: testowanie połączeń, liniowy rejestr pierścieniowy R-LFSR, słownik diagnostyczny.

Small-size signature-based diagnostic dictionary for testing of interconnections

Abstract

The paper is devoted to a new technique enabling the substantial reduction of the size of a diagnostic dictionary used for detection, localization and identification of static and delay faults in interconnections that are tested with use of ring linear feedback shift registers (R-LFSR). The proposed method assumes that the bus under test comprises n lines and is structured into b fragments of the size of k lines per each fragment. The method also assumes that each of the aforementioned fragments is tested by means of a separate R-LFSR with its length of $2k$ bits. The example of such a solution is presented in Fig. 1. Moreover, the test procedure is subdivided into four phases in which odd and even R-LFSRs work alternately. Operation modes for individual registers during subsequent phases and their seeds are summarized in Table 1. The proposed way of subdivision of the test procedure makes it possible to get rid of the mutual interference between two adjacent R-LFSRs in case of occurring a short-circuit between the feedback lines of these neighbouring registers. Such interactions were the drawback of the previous methods and presented the impediment that prevented the fault dictionary from having its size reduced [2]. The solution that is suggested in this study enables substantially diminishing the dictionary, where its actual size is determined by the multiplicity of r defects within each k -bit part of the connecting bus, even when the bus width $n \gg k$ [3, 4].

Keywords: interconnect test, Ring-LFSR, R-LFSR, diagnostic dictionary.

1. Wprowadzenie

Rozróżnia się dwa rodzaje wbudowanego samotestowania połączeń (ang. Interconnect Built-In Self Test) - IBIST: test-per-scan [8, 10] oraz test-per-clock [2-7, 9]. Każde z nich ma różne właściwości. IBIST typu test-per-scan wymaga np. długiego czasu testowania. Tej wady nie posiada IBIST typu test-per-clock, który umożliwia testowanie w czasie znacząco krótszym. Ponadto ten typ testera wbudowanego umożliwia wykrywanie uszkodzeń dynamicznych takich jak np. uszkodzenia opóźnieniowe, przesłuchy i inne [1].

W ostatnich latach do testowania połączeń zaczęto stosować nowy rodzaj IBIST typu test-per-clock o postaci rejestr pierścieniowego R-LFSR [5, 6]. W tej strukturze testera IBIST n linii magistrali podlegającej testowaniu pracuje jako linie sprzężenia zwrotnego tego rejestru R-LFSR. Komórki będące normalnie n nadajnikami sygnałów tej magistrali połączeń oraz n odbiornikami sygnałów z tej magistrali podczas testowania tworzą $2n$ bitowy rejestr przesuwający, który wraz z n liniami testowanej magistrali tworzy pierścieniowy rejestr R-LFSR. W trakcie testowania rejestru R-LFSR generuje $2n$ bitowe wektory pseudolosowe. Połowa każdego wektora stanowiąca jego n bardziej znaczących bitów jest pobudzeniem testowym dla testowanej magistrali n połączeń.

Wykrycie uszkodzenia w magistrali połączeń wymaga, aby dla losowo wybranego stanu początkowego SD rejestru R-LFSR oraz dla sekwencji m kolejnych stanów w tym rejestrze końcowy stan (sygnatura) takiej, związanej ze sprawną magistralą połączeń, sekwencji $S_m F_0$, różnił się od każdego końcowego stanu (sygnatury) $S_m F_j$ sekwencji uzyskanej dla uszkodzonej magistrali połączeń.

W praktyce musi być określona sygnatura $S_m F_0$ dla sprawnej magistrali połączeń (sprawnego rejestru R-LFSR) i jednocześnie musi być określony zbiór sygnatur $\{S_m F_j\}$ odpowiadających uszkodzeniom zamodelowanym na magistrali połączeń stanowiących linie sprzężenia zwrotnego rejestru R-LFSR. W ten sposób otrzymuje się sygnaturowy słownik diagnostyczny $DD = S_m F_0 \cup \{S_m F_j\}$. Umożliwia on wykrycie wszystkich tych defektów F_j na magistrali połączeń, które spełniają warunek $S_m F_j \neq S_m F_0$.

Badania rejestrów R-LFSR [5, 6] potwierdziły ich przydatność do wykrywania, lokalizowania i identyfikowania statycznych i opóźnieniowych uszkodzeń w magistralach nie krzyżujących się połączeń.

Wszystkie ww. metody wykorzystujące rejestr R-LFSR i związany z nimi sygnaturowy słownik diagnostyczny posiadają istotną wadę jaką jest szybki wzrost objętości tego słownika wraz ze wzrostem liczby n linii testowanej magistrali oraz wzrostem wielokrotności rozpatrywanych uszkodzeń. Dla magistrali kilkusetbitowej słownik którego rozmiar jest proporcjonalny do n^r rozrasta się do rozmiarów, które z praktycznego punktu widzenia uniemożliwiają stosowanie tej metody.

Niniejszy artykuł przedstawia efektywne rozwiązanie nakreślonego powyżej problemu, które jest zwięźleniem poprzednich prac autorów [2-4].

2. Proponowane rozwiązanie

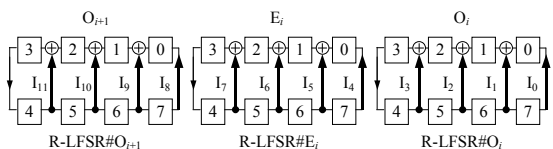
Podobnie jak w [5, 6] przyjęto w niniejszej pracy następujące typy uszkodzeń testowanej sieci połączeń: zwarcia typu AND/OR co najwyżej p_{max} sąsiednich linii, sklejenia z 0/1 (Sa0/Sa1) oraz uszkodzenia opóźnieniowe zbrocza narastającego i/lub opadającego przesyłanych sygnałów. Z powodów technologicznych założono ponadto, że zwarcia typu AND nie występują równocześnie ze zwarciami typu OR. Maksymalna wielokrotność uszkodzeń występujących wewnątrz każdego testowanego k -bitowego fragmentu magistrali to $r_{max}=3$.

W celu zachowania niewielkich rozmiarów słownika diagnostycznego DD pomimo wzrostu liczby n testowanych połączeń oraz krotności r rozpatrywanych uszkodzeń wykorzystano dwie następujące metody:

M1: podział n -bitowej magistrali na mniejsze k -bitowe fragmenty (gdzie $n \gg k$), które są równocześnie testowane za pomocą $b = n/k$ wzajemnie rozdzielnych rejestrów R-LFSR, z których każdy zawiera $2k$ komórek oraz każdy rozpoczyna pracę od tego samego stanu początkowego SD [2],

M2: zastosowanie czterech faz testowania oraz naprzemienna praca parzystych i nieparzystych rejestrów R-LFSR ustawianych w poszczególnych fazach w odpowiednie stany początkowe [3, 4].

Przykład takiego rozwiązania dla $n = 12$, $k = 4$ oraz $b = 3$ przedstawiony jest na rys. 1.



Rys. 1. Struktura IBIST: trzy oddzielne 8-bitowe rejestry R-LFSR
Fig. 1. The IBIST structure: three separated 8-bit R-LFSRs

Połączenia, które stanowią testowaną magistralę są zaznaczone na tym rysunku za pomocą pogrubionych linii i oznaczone odpowiednio przez I_0 - I_{11} . Podczas operacji testowania magistrala jest rozdzielona na $b = 3$ wzajemnie odseparowane od siebie fragmenty z których każdy zawiera $k = 4$ linie. Procedura testująca dla każdego z tych fragmentów wykorzystuje identyczne $2k$ komórkowe rejestry R-LFSR gdzie każda z $2k = 8$ komórek jest przerzutnikiem typu D. Wszystkie te rejestry w trakcie testowania są wzajemnie odseparowane od siebie. Ponadto rejestry R-LFSR podzielono na nieparzyste R-LFSR# O_i oraz parzyste R-LFSR# E_i , gdzie $i \in \{1, 2, \dots, b/2\}$. W skrócie rejestry te także będą oznaczane jako odpowiednio O_i oraz E_i . W kolejnych fazach parzyste (E_i) i nieparzyste (O_i) rejestry R-LFSR pracują na przemian. Podczas gdy rejestry parzyste (nieparzyste) pracują w trybie test to rejestry nieparzyste (parzyste) pozostają w trybie Hold – tzn. nie zmieniają swego stanu. Tryby pracy oraz stany początkowe (ang. seed) poszczególnych rejestrów w poszczególnych fazach zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Stany początkowe i tryby pracy rejestrów R-LFSR w poszczególnych fazach testowania

Tab. 1. Seed applied and operation mode of R-LFSRs for each test phase

Faza	Rejestr nieparzysty			Rejestr parzysty		
	Stan początkowy	Tryb pracy		Stan początkowy	Tryb pracy	
	# O_{i+1}	# O_i		# E_{i+1}	# E_i	
I	00...00	11...11	Hold	SD	SD	Test
II	11...11	00...00	Hold	SD	SD	Test
III	SD	SD	Test	00...00	11...11	Hold
IV	SD	SD	Test	11...11	00...00	Hold

SD oznacza wartość stanu początkowego, która jest identyczna dla wszystkich rejestrów R-LFSR pracujących (tryb Test) w danej fazie

Zastosowanie metody M1 pozwala na wykorzystywanie tego samego słownika diagnostycznego DD do testowania każdego k -bitowego fragmentu magistrali połączeń. To z kolei umożliwia testowanie magistral zawierających setki linii oraz uszkodzeń o wielokrotności dużo większej niż podana w [5, 6] przy użyciu sygnaturowego słownika diagnostycznego o wymiarach akceptowalnych z praktycznego punktu widzenia.

Jednakże, jak pokazano w [2], metoda M1 obciążona jest pewną wadą. Zwarcie występujące pomiędzy liniami należącymi do sąsiednich rejestrów R-LFSR powoduje, że rejestry te wzajemnie wpływają na siebie. Prowadzi to do sytuacji gdy dowolne inne uszkodzenie występujące równocześnie z w/w zwarciami w jednym z rejestrów wywołuje zmianę końcowej sygnatury w obu rejestrach. Wymaga to pamiętania w słowniku DD również sygnatur odpowiadających wielu kombinacjom uszkodzeń w sąsiednich rejestrach R-LFSR, co w konsekwencji prowadzi do znacznego wzrostu jego rozmiarów.

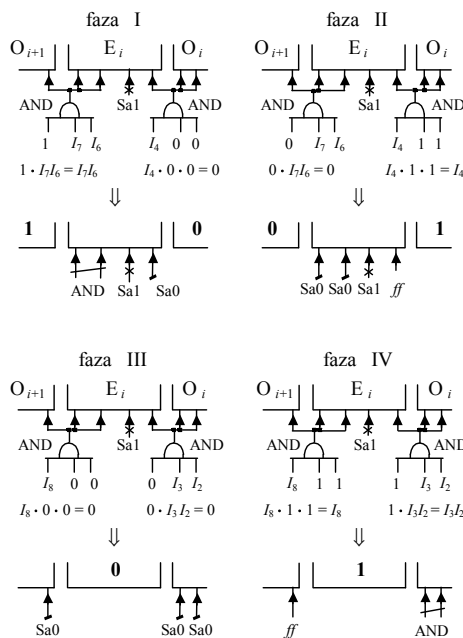
Łączne stosowanie metod M1 i M2 eliminuje tę wadę. Fakt, że w każdej z czterech faz pracuje tylko co drugi rejestr R-LFSR eliminuje ww. negatywne efekty wynikające ze wzajemnego wpływu na siebie sąsiednich rejestrów. Natomiast wykorzystanie czterech faz połączone z ustawianiem odpowiedniego stanu w rejestrach będących w danej fazie w trybie Hold zapewnia jednoznaczny lokalizację i identyfikację uszkodzeń.

Poniższy przykład ilustruje zastosowanie zaproponowanego rozwiązania w praktyce.

Przykład 1

Założono, że w testowanej sieci połączeń z rys. 1 występują dwa uszkodzenia typu zwarcia AND trzech sąsiednich połączeń - zwarte są ze sobą odpowiednio linie I_2 - I_4 oraz I_6 - I_8 . Zauważmy, że oba zwarcia łączą linie należące do różnych sąsiednich rejestrów. Ponadto przyjęto, że linia I_5 uległa sklejeniu z 1 (Sa1). Mamy więc do czynienia z uszkodzeniem $r=3$ krotnym na całej 12-bitowej magistrali.

Rys. 2 przedstawia jakiego typu uszkodzenia są obserwowane w poszczególnych fazach testowania w odpowiednich rejestrach. Widoczne na rysunku bramki AND to logiczna reprezentacja ww. zwarć. Natomiast wykorzystywane na rysunku skróty Sa0/1, AND oraz ff , oznaczają odpowiednio sklejenie linii z 0/1, zwarcie typu AND między połączeniami oraz brak obserwowalnego w danej fazie uszkodzenia wskazanej linii.



Rys. 2. Typy uszkodzeń obserwowalne w poszczególnych fazach testowania
Fig. 2. Types of faults observed in each test phase

Zauważmy, że we wszystkich fazach w każdym z pracujących rejestrów R-LFSR ewentualne uszkodzenia w nim obserwowane dotyczą wyłącznie k linii testowanych przez ten rejestr. Dzięki temu możliwe jest stosowanie niewielkiego słownika DD zawierającego wyłącznie sygnatury odpowiadające uszkodzeniom k -bitowego fragmentu magistrali. Natomiast sposób lokalizacji i identyfikacji faktycznych uszkodzeń całej magistrali na podstawie uszkodzeń obserwowanych w każdej z faz w poszczególnych rejestrach R-LFSR został omówiony w następnym rozdziale.

3. Lokalizacja i identyfikacja uszkodzeń

Para sygnatur odczytanych z rejestru parzystego w fazach I i II oraz rejestru nieparzystego w fazach III i IV jednoznacznie określa zbiór uszkodzeń obserwowanych w każdym z tych rejestrów.

Przyjmijmy teraz, że I_O oraz I_E to pewne, potencjalnie uszkodzone, linie testowane przez rejestry odpowiednio R-LFSR# O_i oraz R-LFSR# E_i . Ponadto, jak już wspomniano w sekcji 1, brane są pod uwagę zwarcia linii magistrali jednego typu - AND albo OR. W związku z tym, w poniższym opisie należy przyjąć $\varepsilon=0$ dla zwarć typu AND oraz $\varepsilon=1$ dla zwarć typu OR. Przy takich założeniach scenariusz diagnostyki uszkodzeń w testowanej magistrali połączeń można przedstawić w następujący sposób.

- Jeżeli sygnatury otrzymane w rejestrze E_i (O_i) w fazach I i II (III i IV) świadczą o braku uszkodzenia linii, to linia ta faktycznie jest sprawna. Analogicznie, jeżeli sygnatury otrzymane w rejestrze E_i (O_i) w fazach I i II (III i IV) wskazują na taki sam typ uszkodzenia linii I_E (I_O), to jest to faktyczny typ uszkodzenia tej linii.
- Jeżeli żadna z sytuacji wymienionych w punkcie 1 nie zachodzi, to mamy do czynienia z jednym z następujących przypadków:
 - Jeżeli sygnatura otrzymana w rejestrze E_i w fazie I (II) wskazuje na sklejanie linii I_E z poziomem logicznym ε a sygnatura otrzymana w tym rejestrze w fazie II (I) wskazuje, że linia ta jest sprawna lub jest zwarta z sąsiednimi liniami rejestru E_i , to linia I_E jest elementem zwarcia między liniami należącymi do rejestrów E_i oraz O_i (O_{i+1}).
 - Jeżeli sygnatura otrzymana w rejestrze O_i w fazie III (IV) wskazuje na sklejanie linii I_O z poziomem logicznym ε a sygnatura otrzymana w tym rejestrze w fazie IV (III) wskazuje, że linia ta jest sprawna lub jest zwarta z sąsiednimi liniami rejestru O_i , to linia I_O jest elementem zwarcia między liniami należącymi do rejestrów O_i oraz E_i (E_{i+1}).

Ponadto analogiczna analiza dokonana w sąsiednich rejestrach, tj. E_{i+1} oraz O_{i+1} , pozwala na ustalenie szerokości zwarć obejmujących linie sąsiednich rejestrów.

4. Rozmiar słownika diagnostycznego

Rozmiary słownika diagnostycznego otrzymane w omawianym tu podejściu oraz w poprzednio opracowanych metodach, dla wybranych wartości parametrów n , i k zestawiono w tabeli 2.

Tab. 3. Rozmiar sygnaturowego słownika diagnostycznego DD dla różnych metod
Tab. 3. Size of the signature-based diagnostic dictionary DD for different methods

1	2 [5, 6]		3 [2]	4
	DD		DD	DD
	$n = 64$	$n = 128$		
8	$6,11 \cdot 10^{28}$	$3,73 \cdot 10^{57}$	377542	4209
12	$4,02 \cdot 10^{25}$	$8,71 \cdot 10^{46}$	3449182	19379
16	$7,03 \cdot 10^{18}$	$4,94 \cdot 10^{37}$	14387422	53749
20	$1,57 \cdot 10^{20}$	$2,21 \cdot 10^{35}$	41240262	115319
24	$8,86 \cdot 10^{15}$	$7,85 \cdot 10^{31}$	94935702	212089
28	$4,09 \cdot 10^{16}$	$4,86 \cdot 10^{27}$	189281742	352059
32	$2,84 \cdot 10^{11}$	$8,08 \cdot 10^{22}$	340966382	543229

W kolumnie 1 tabeli podano wartości parametru k , dla jakich wyznaczono rozmiary słowników diagnostycznych. W kolumnach 2 i 3 zamieszczono rozmiary słowników diagnostycznych dla metod przedstawionych odpowiednio w [5, 6] oraz [2]. Kolumna 4 zawiera wynik dla metody prezentowanej w tej pracy. W kolumnie 2 podano wyniki dla dwóch różnych szerokości n magistrali połączeń. Zauważmy, że w podejściu przedstawionym w niniejszym artykule rozmiary sygnaturowego słownika diagnostycznego DD są znacznie mniejsze niż w przypadku poprzednio opracowanych rozwiązań.

5. Podsumowanie

Zaproponowana metoda pozwala na detekcję oraz wiarygodną i niezawodną lokalizację i identyfikację uszkodzeń w połączeniach tworzących magistralę o szerokości nawet kilkuset bitów. Jednocześnie wymaga ona zastosowania tylko niewielkiego słownika diagnostycznego o wielkości nie przekraczającej pojedynczych megabajtów.

Jak pokazano w [3, 5, 6] długość sekwencji testującej gwarantującej wysoką skuteczność testowania wynosi tylko $4k > m > 2k$ dla każdej z faz. Dlatego czynnikiem decydującym o czasie testowania jest czas niezbędny do czterokrotnego wprowadzenia stanów początkowych do rejestrów R-LFSR oraz wyprowadzenia otrzymanych sygnatur do zewnętrznego testera. Czas ten jest proporcjonalny do liczby testowanych połączeń typu magistralowego, która w układach SoC wynosi kilkaset, a więc jest akceptowalny z praktycznego punktu widzenia.

6. Literatura

- Attarha A., Nourani M.: Testing interconnects for noise and skew in gigahertz SoC, Proc. of Int. Test Conf. - ITC'01, Baltimore, USA, str. 305-314, 2001.
- Garbolino T., Gucwa K., Hławiczka A.: How to reduce size of a signature-based diagnostic dictionary used for testing of connections, IEEE Int. Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems - DDECS'10, Vienna, Austria, str. 201-204, 2010.
- Garbolino T., Gucwa K., Hławiczka A.: Testing of interconnections with use of reduced size signature based diagnostic dictionary, Proc. of IEEE Int. Conf. Mixed Design of Integrated Circuits and Systems - MIXDES'10, Wrocław, Poland, str. 486-491, 2010.
- Garbolino T., Gucwa K., Hławiczka A.: Reduced-size Signature-based Diagnostic Dictionary for Interconnection Testing, Proc. of the 10th International IFAC Workshop on Programmable Devices and Embedded Systems - PDeS'10, Szczecin, Poland, 2010.
- Hławiczka A., Gucwa K., Garbolino T., Kopec M.: Interconnect faults identification and localization using modified ring LFSR, Proc. of IEEE Workshop on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems - DDECS'08, Bratislava, Slovakia, str. 247-250, 2008.
- Hławiczka A., Gucwa K., Garbolino T., Kopec M.: Application of modified Ring-LFSR for interconnect faults detection, Proc. of IEEE International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems - MIXDES'08, Poznań, Poland, str. 487-492, 2008.
- Jutman A.: At-speed on-chip diagnosis of board-level interconnect faults, IEEE European Test Symposium - ETS'04, Corsica, France, str. 2-9, 2004.
- Koeter J., Sparks S.: Interconnect testing using BIST embedded in IEEE 1149.1 Designs, Proc. of Int. ASIC Conf., str. P11-2.1- P11-2.4, 1991.
- Pendurkar R., Chatterjee A., Zorian Y.: Switching activity generation with automated BIST synthesis for performance testing of interconnects, IEEE Trans. on CAD/ICS, vol. 20, (No 9), str. 1143-1158, 2001.
- Su C., Tseng W.: Configuration free SoC interconnect BIST methodology, Proc. of Int. Test Conf., Baltimore, USA, str. 1033-1038, 2001.