

**Andrzej HŁAWICZKA, Krzysztof GUCWA, Tomasz GARBOLINO**  
POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI

## Testowanie dynamicznych uszkodzeń typu przesłuchy w sieciach połączeń przy użyciu rejestrów pierścieniowych R-LFSR

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](mailto:andrzej.hlawiczka@polsl.pl)



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.

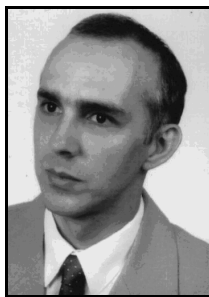
e-mail: [tomasz.garbolino@polsl.pl](mailto:tomasz.garbolino@polsl.pl)



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](mailto:krzysztof.gucwa@polsl.pl)



### Streszczenie

W pracy przedstawiono nową metodę wykrywania przesłuchów w połączeniach. Testowaniu poddaje się tylko te połączenia FPGA, które będą wykorzystywane przez docelową aplikację. Zaproponowana struktura testera wbudowanego (BIST) wykorzystuje rejestr pierścieniowy 3n-R-LFSR, który w swojej części odpowiedzialnej za generowanie par testowych ma podwojoną liczbę przerzutników. Do testowanej sieci  $n$  połączeń jest podłączony tylko co drugi przerzutnik. Taka struktura generuje wszystkie pary niezbędne do pobudzenia przesłuchów co jest niemożliwe w klasycznej strukturze R-LFSR. Eksperymenty potwierdziły skuteczność testera BIST w pobudzeniu określonych przesłuchów.

**Słowa kluczowe:** rejestr liniowy, rejestr pierścieniowy, generator testów, przesłuchy, samotestowanie, sieć połączeń.

### On the use of a ring LFSR for testing crosstalk faults in interconnect networks

#### Abstract

A new method of detection of crosstalk faults is presented in the paper. An interconnect network employed by a target application is a sole subject of the test. The detection of crosstalk fault requires stimulation of the interconnect network under test (INUT) with two consecutive test patterns. The test patterns have to be applied to inputs of the INUT at a nominal clock frequency. So using the Built In Self Test (BIST) is a must. The proposed BIST structure is based on a ring register called 3n-R-LFSR (Fig.1). In contrast to a typical ring register, the 3n-R-LFSR contains a double number  $2n$  of flip-flops in its part that is responsible for two-test pattern generation. The  $n$  lines of the INUT are fed from the outputs of every second flip-flop of that part of the register. Such structure of the BIST is capable of generating all two-test patterns that are required to stimulate crosstalk faults in the INUT, which is impossible in the case of a classical R-LFSR. At the beginning of a test session the 3n-R-LFSR is seeded with a chosen value. After  $g$  clock cycles the final state (signature) is read. In more complex cases crosstalk can be observed only if a number  $k$  of lines being aggressors change their state simultaneously. The experiments proved that for  $k \ll n$  it is possible to find the initial seed being the beginning of a test sequence, that stimulate all required crosstalks. The length of the test sequence and simulation time  $\tau$  necessary for finding initial seed is acceptable (Tab. 3).

**Keywords:** test pattern generator, crosstalks, BIST, LFSR, R LFSR, interconnect net.

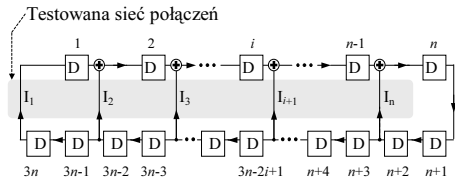
### 1. Wstęp

Niniejsza praca poświęcona jest dedykowanemu konkretnej aplikacji testowaniu przesłuchów w połączeniach wewnątrz układów FPGA. Wykorzystanie technologii submikronowych powoduje zwiększenie pojemności pasożytniczych między połączeniami sąsiednimi geometrycznie. To z kolei prowadzi do powstawania na tyle silnych przesłuchów między tymi połączeniami, że mogą one prowadzić do nieprawidłowego działania zaprogramowanego układu FPGA [1-3]. Takie uszkodzenia dynamiczne do wykrycia wymagają par testowych i trybu "test-per-clock", w którym podawanie pobudzeń testowych przeprowadza się przy pełnej szybkości zegara. W związku z tym konieczne jest wykorzystanie wbudowanego samotestowania BIST (ang. Built-In Self-Test) [4-7]. Podczas samotestowania komórki układu FPGA wchodzące w skład realizowanej aplikacji są przekształcane w elementy (tj. przerzutniki i bramki XOR) układu BIST. Dobrym przykładem układu BIST dla połączeń jest rejestr pierścieniowy R-LFSR [8-10], którego  $n$  pętli sprzężeń zwrotnych jest w trakcie testowania liniami testowanej magistrali połączeń.

W pracy [8] wykorzystywano 2n-bitowy rejestr pierścieniowy R-LFSR do detekcji, lokalizacji oraz identyfikacji wyłącznie uszkodzeń statycznych oraz opóźnień. Wykorzystanie tej techniki do wykrywania przesłuchów ma istotne ograniczenia. Jej podstawową wadą jest brak możliwości wygenerowania niektórych par testów koniecznych dla pobudzenia przesłuchów. W rejestrze pierścieniowym R-LFSR, podobnie jak w klasycznym rejestrze przesuwającym, po ustawieniu pary jego stopni  $i$  oraz  $i+1$  parą stanów  $xy$  niemożliwe jest wygenerowanie na tych stopniach w następnym takcie zegarowym pary stanów  $zx'$ , gdzie  $x'$  jest zanegowanym stanem  $x$ . Jest to wynikiem równości stanu następnego stopnia  $i+1$  oraz stanu poprzedniego stopnia  $i$ -tego w trakcie przesuwania bitów w rejestrze przesuwającym.

Problem ten rozwiązano poprzez podwojenie liczby przerzutników w połowie rejestru R-LFSR odpowiedzialnej za generowanie kolejnych  $n$ -bitowych par testowych. Do testowanej sieci połączeń jest podłączony tylko co drugi przerzutnik. Taki sposób podłączenia eliminuje zjawisko tzw. „shift dependency”. Ponieważ stany przerzutników parzystych są niezależne od zawartości przerzutników nieparzystych dlatego taki generator wygeneruje wszystkie możliwe pary testów. Tak zmodyfikowany rejestr pierścieniowy zawierający razem  $3n$  przerzutników będzie dalej oznaczany przez 3n-R-LFSR (rys. 1). Jego liniowe sprzężenie zwrotne opisuje rozkładalny wielomian charakterystyczny  $p(x)$ . Po  $m$  taktach zegarowych testowania ostatni  $3n$  bitowy stan rejestru jest odczytywany jako sygnatura. W celu uzyskania powtarzalności rezultatów testowania przed rozpoczęciem procesu testowania do rejestru wprowadzany jest wybrany stan początkowy. Na podstawie sygnatury stwierdza się czy testowana magistrala połączeń jest sprawna. Dalej dokonuje się rekonfiguracji układu FPGA, tak aby inny - jeszcze nie przetestowany zestaw połączeń danej aplikacji

(traktowany jako magistrała połączeń) - stanowił linie sprzężenia zwrotnego rejestru pierścieniowego.



Rys. 1. Tester wewnętrzny w postaci rejestru pierścieniowego 3n-R-LFSR  
Fig. 1. BIST structure having a form of a ring register 3n-R-LFSR

Celem tej pracy jest wykazanie, że taki generator testów z podwojoną liczbą przerzutników 2n w części generującej pobudzenia (dolny wiersz przerzutników na rys. 1) jest skutecznym generatorem n-bitowych par testowych dla pobudzania określonych przesłuchów w sieci n połączeń w układach FPGA.

### 2. Motywacja

W najprostszym przypadku w wyniku przesłuchu stan jednej linii zwanej agresorem (ang. aggressor) wpływa na stan innej linii w zwanej ofiarą (ang. victim). Z jednej strony pojawienie się zbocza 01(10) na linii agresora może spowodować powstanie chwilowego zakłócenia - tzw. szpilki (ang. glitch) - na linii ofiary o stałej wartości v=00 (v=11). Z drugiej strony wystąpienie zbocza o jednym kierunku np. 10 (01) na linii agresora może doprowadzić do opóźnienia pojawienia się na linii ofiary v zbocza o przeciwnym kierunku 01 (10). Dalej oba powyższe zjawiska będą nazywane przesłuchami typu G (od ang. Glitch) i D (od ang. Delay). W bardziej złożonych przypadkach do wystąpienia przesłuchu konieczne jest jednoczesne pojawienie się zbocza o tym samym kierunku na kilku liniach agresorów. W celu określenia liczby k agresorów powodujących przesłuch typu D lub G przesłuchy te oznaczają będziemy odpowiednio przez D<sub>k</sub> i G<sub>k</sub>.

Ponieważ do powstania przesłuchu konieczne jest wystąpienie zbocza na liniach agresorów więc niezbędne jest podanie na sieć połączeń pary wektorów testowych. Wybrane pary wektorów testowych pobudzające omówione poprzednio przesłuchy podano w tabeli 1. W kolumnach 1 i 3 tej tabeli podano typ przesłuchu, natomiast w kolumnach 2 i 4 zamieszczono pary wektorów pobudzających dany przesłuch.

Tab. 1. Wybrane pary wektorów testowych  
Tab. 1. Examples of two-test patterns

G <sub>1</sub> ; v = 00	XX...X00X...XXXX XX...X10X...XXXX	G <sub>1</sub> ; v = 11	XX...X11X...XXXX XX...X01X...XXXX
D <sub>1</sub> ; v = 10	XX...X01X...XXXX XX...X10X...XXXX	D <sub>1</sub> ; v = 01	XX...X10X...XXXX XX...X01X...XXXX
G <sub>3</sub> ; v = 00	XX...X000X...XX XX...X101X...XX	G <sub>3</sub> ; v = 11	XX...X111X...XX XX...X010X...XX
D <sub>3</sub> ; v = 10	XX...X010X...XX XX...X101X...XX	D <sub>3</sub> ; v = 01	XX...X101X...XX XX...X010X...XX

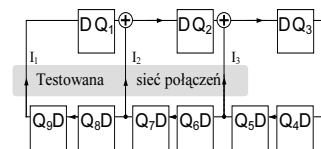
W niniejszej pracy założono, że topologia n połączeń nie jest znana. Tego typu założenie wymaga wygenerowania wszystkich możliwych par pobudzających wszystkie cztery typy przesłuchów {D<sub>k</sub>; v = 01}, {D<sub>k</sub>; v = 10}, {G<sub>k</sub>; v = 00}, {G<sub>k</sub>; v = 11}. Zbiór wszystkich możliwych par testów dla k agresorów oraz sieci n połączeń oznaczany będzie w pracy przez S<sub>k,n</sub>. Liczność takiego zbioru można wyrazić wzorem (1).

$$|S_{k,n}| = L = 4n \binom{n-1}{k} \quad (1)$$

### 3. Generator par testowych 3n-R-LFSR

Rozpatrzmy przykład sieci n=3 połączeń oraz przykład rejestru pierścieniowego 3n-R-LFSR o wielomianie charakterystycznym p(x) = 1+x<sup>3</sup>+x<sup>6</sup>+x<sup>9</sup> zawierającego 9 przerzutników D, z których

następujących sześć Q<sub>9</sub>, Q<sub>8</sub>, Q<sub>7</sub>, Q<sub>6</sub>, Q<sub>5</sub>, Q<sub>4</sub> stanowi fragment pierścienia generującego pary testowe a przerzutniki Q<sub>9</sub>, Q<sub>7</sub> oraz Q<sub>5</sub> są podłączone do wejść sieci połączeń I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub> oraz I<sub>3</sub>, (rys. 2). Wielomian p(x) jest wielomianem rozkładalnym powodującym, że graf pracy omawianego rejestru pierścieniowego jest grafem cyklicznym zawierającym kilkadziesiąt różnych cykli 6 i 12 stanowych. Cykle te pozwalają na utworzenie różnych sekwencji par testowych zawierających co najwyżej odpowiednio 7 lub 13 par testowych. Jest to zdecydowanie za mało w porównaniu z licznością zbioru S<sub>1,3</sub>. Jednym z rozwiązań tego problemu jest modyfikacja rejestru pierścieniowego zmieniająca jego liniowe sprzężenie zwrotne w taki sposób, aby jego cykliczny graf pracy zawierał co najmniej jeden cykl o bardzo dużej liczbie stanów. Wówczas losowo wybrany stan początkowy rejestru 3n-R-LFSR może stać się początkiem sekwencji testującej T zawierającej wszystkie niezbędne pary testów. W przypadku naszego przykładu można to zrealizować np. po wprowadzeniu przerzutnika T (dodatkowa pętla sprzężenia zwrotnego) w miejscu przerzutnika Q<sub>9</sub>. Uzyskujemy w ten sposób rejestr pierścieniowy z wielomianem pierwotnym p(x) = 1+x<sup>2</sup>+x<sup>3</sup>+x<sup>5</sup>+x<sup>6</sup>+x<sup>8</sup>+x<sup>9</sup> gwarantującym, że graf pracy składa się z dwóch cykli: jednego 2<sup>3n</sup>-1 = 2<sup>9</sup>-1=511 stanowego i drugiego jednostanowego.



Rys. 2. Schemat przykładowego rejestru pierścieniowego 3n-R-LFSR  
Fig. 2. Schematic diagram of exemplary two-test pattern generator

W tabeli 2 przedstawiono kolejne wektory ciągu T generowanego przez nasz zmodyfikowany rejestr pierścieniowy 3n-R-LFSR zakładając, że został on wstępnie ustawiony w stan 010001000 (szare pola oznaczają stany przerzutników odpowiednio Q<sub>9</sub>, Q<sub>7</sub> oraz Q<sub>5</sub>). W lewej części tej tabeli zaznaczono tłustymi czcionkami wszystkie te zbocza, które pobudzają przesłuchy typu D<sub>1</sub>, a więc te, które zawierają zbocza o jednym kierunku na linii agresora oraz zbocza o przeciwnym kierunku na linii ofiary. Pary testów ciągu T pobudzające wszystkie przesłuchy typu D<sub>1</sub> na każdej z trzech linii Q<sub>9</sub>, Q<sub>7</sub>, oraz Q<sub>5</sub> występują w następujących taktach zegarowych: <3,4>, <10,11>, <12,13>, <15,16>, <18,19> oraz <19,20>. W prawej części tabeli 2 zaznaczono z kolei tłustymi cyframi zbocza na tych pojedynczych liniach agresorów, które mogą spowodować powstanie przesłuchu typu G<sub>1</sub> - na linii ofiary o stałej wartości 1.

Tab. 2. Fragment sekwencji T pobudzającej przesłuchy D<sub>1</sub> oraz {G<sub>1</sub>; v = 11}  
Tab. 2. Part of T sequence stimulating D<sub>1</sub> and {G<sub>1</sub>; v = 11} type crosstalks

Zbocza pobudzające przesłuchy D <sub>1</sub>				Zbocza pobudzające przesłuchy G <sub>1</sub>			
	987654321		987654321		987654321		987654321
00	010001000	10	<b>01001101</b>	00	010001000	10	011001101
01	100010000	11	<b>110011000</b>	01	100010000	11	<b>110011000</b>
02	100100101	12	<b>000110101</b>	02	100100101	12	<b>000110101</b>
03	101001011	13	<b>001101110</b>	03	101001011	13	<b>001101110</b>
04	110010101	14	<b>011011110</b>	04	110010101	14	<b>011011110</b>
05	000101111	15	<b>110111010</b>	05	000101111	15	<b>110111010</b>
06	001011110	16	<b>001110001</b>	06	001011110	16	<b>001110001</b>
07	010111010	17	<b>011100100</b>	07	010111010	17	<b>011100100</b>
08	101110000	18	<b>111001010</b>	08	101110000	18	<b>111001010</b>
09	111100111	19	<b>010010111</b>	09	111100111	19	<b>010010111</b>
10	011001101	20	<b>100101010</b>	10	011001101	20	<b>100101010</b>

Zauważmy, że ustawiając rejestr pierścieniowy 3n-R-LFSR w stan początkowy 01001000 otrzymujemy w ciągu testowym T w jego kolejnych 20 taktach zegarowych wszystkie zawarte w zbiorze S<sub>1,3</sub> pary testów pobudzających przesłuchy typu D<sub>1</sub> oraz G<sub>1</sub> na każdej z trzech linii Q<sub>9</sub>, Q<sub>7</sub>, oraz Q<sub>5</sub>. Zatem nie jest potrzebny cały cykl 511 stanów do wygenerowania wszystkich niezbędnych par testowych. Zwróćmy uwagę również, że liczba 20 taktów zegarowych jest również mniejsza od licznosci L=24 zbioru S<sub>1,3</sub>. Wynika to z faktu, że niektóre pary pobudzają równocześnie więcej niż jedno uszkodzenie.

Przykład ten umotywił autorów do sprawdzenia skuteczności testowania za pomocą rejestrów 3n-R-LFSR przesłuchów  $D_k$  oraz  $G_k$  dla magistral zawierających 8 i więcej połączeń oraz  $k \ll n$ .

#### 4. Eksperymenty

Ze względu na przemijający charakter błędów wywołanych uszkodzeniami dynamicznymi typu przesłuchy ich zamodelowanie stanowi poważną trudność. W związku z tym cel eksperymentów symulacyjnych ograniczono wyłącznie do znalezienia sekwencji pobudzającej wszystkie założone przesłuchy. To, że sygnatura w rejestrze 3n-R-LFSR jest dłuższa o  $n$  bitów od sygnatury rejestru pierścieniowego opisanego w pracach [8] pozwoliło autorom założyć, że prawdopodobieństwo maskowania błędów będzie praktycznie równe zeru. Wprowadzając w rejestrze 3n-R-LFSR przerzutnik T na miejscu przerzutnika  $Q_{3n}$  uzyskujemy rejestr pierścieniowy o wielomianie charakterystycznym:

$$p(x) = 1 + \sum_{i=1}^n (x^{3i-1} + x^{3i}) \quad (2)$$

gwarantującym, że graf pracy zawiera co najmniej jeden cykl z bardzo dużą liczbą stanów. Sprawdzono to praktycznie i stwierdzono, że dla każdego  $3n \in \{36, 48, 60, 72, 84, 96\}$  po 100 losowaniach stanu początkowego uzyskano co najmniej jeden stan początkowy należący do dużego cyklu zawierającego ponad  $10^7$  stanów. Jedynie dla  $3n = 24$  największy uzyskany cykl posiadał około  $3 \times 10^5$  stanów. Oznaczmy przez  $g$  najmniejszą długość takiej sekwencji T, która zawiera wszystkie pary testów niezbędnych do pobudzenia założonych przesłuchów typu  $D_k$  oraz  $G_k$  magistrali  $n$  połączeń. Celem eksperymentów było określenie wartości  $g$ , znacząco mniejszej od licznosci  $L$  zbioru  $S_{k,n}$ . Eksperymenty przeprowadzono dla magistral zawierających 8, 12, 16, 20, 24, 28 oraz 32 połączenia. Założono jednocześnie, że generowane na tych magistralach sekwencje T zawierają  $n$ -bitowe pary testowe pobudzające przesłuchy ze zbioru  $P = \{D_1, D_2, D_3, D_4, G_1, G_2, G_3, G_4\}$  co spełnia warunek  $k \ll n$ . W celu przeprowadzenia eksperymentu najpierw wygenerowano dla każdej z  $n$ -bitowych magistrali oraz dla  $k$  agresorów wszystkie zbiory  $S_{k,n}$  zawierające wszystkie możliwe pary testów pobudzające przesłuchy ze zbioru P. Następnie w przypadku każdej magistrali i każdej liczby  $k$  agresorów 100 razy losowano stan początkowy i wybierano ten, który gwarantował, że ciąg T zawierał 100% wszystkich określonych wcześniej par testowych ze zbioru  $S_{k,n}$ , a jego długość  $g$  była najmniejsza.

Eksperymenty przeprowadzono przy użyciu komputera Pentium (3,4 GHz). Rezultaty eksperymentów przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Rezultaty eksperymentów dla przesłuchów  $D_3, G_3, D_4, G_4$   
Tab. 3. Experimental results for crosstalks  $D_3, G_3, D_4, G_4$

n	k=3			k=4		
	L	g	$\tau$	L	g	$\tau$
8	1120	1154	3s	1120	4831	14s
12	7920	1390	35s	15840	6850	4min
16	29120	1469	1,5min	87360	8670	40min
20	77520	1851	5min	310080	9525	58min
24	170016	2019	7,5min	850080	10863	3h
28	327600	2302	17min	1965600	11084	6h
32	575360	2202	31min	4027520	11604	13,5h

Ilustrują one wyniki generacji par testowych pobudzających przesłuchy ze zbiorów  $\{D_3, G_3\}$ ,  $\{D_4, G_4\}$ . Uzyskane czasy  $\tau$  symulacji generowania przez rejestr 3n-R-LFSR par testowych dla wszystkich stu stanów początkowych (ang. seed) są akceptowalne. Czas ten, jak można zauważyć w tabeli 3 wzrasta wraz ze wzrostem liczby par testowych L. Zwróćmy jednocześnie uwagę, że drastyczny wzrost licznosci L zbioru  $S_{k,n}$  nie wpływa na znaczący wzrost długości g sekwencji T. Zatem jest nadzieja, że dla magistral o liczbie  $32 < n < 64$  oraz dla liczby agresorów  $k > 4$  długość g ciągu T będzie jeszcze akceptowalna. Ze względu na to, że losowanie seedów można zrównoleglić przy użyciu wielu komputerów, możliwe staje się skrócenie czasu symulacji.

W tabeli 3 pominięto wyniki uzyskane dla przesłuchów ze zbiorów  $\{D_1, G_1\}$ ,  $\{D_2, G_2\}$  gdyż długości g sekwencji T oraz czas symulacji  $\tau$  były dla nich znacząco mniejsze od wartości uzyskanych dla  $k \in \{3,4\}$ .

Uzyskane sekwencje o długości g zawierające wszystkie pary testów pobudzających przesłuchy sprawdzono także z punktu widzenia ich skuteczności w detekcji uszkodzeń statycznych i opóźnieniowych. W związku z tym na wspomnianych wcześniej magistralach zamodelowano także w trakcie dodatkowego eksperymentu najbardziej prawdopodobne z praktycznego punktu widzenia uszkodzenia: pojedyncze, podwójne i potrójne uszkodzenia statyczne typu sklejanie s-a-0 oraz s-a-1, zvarcia (mostki) typu OR i AND sąsiednich 2 oraz 3 linii a także uszkodzenia opóźnieniowe [8]. Stwierdzono, że wszystkie zamodelowane uszkodzenia są wykrywane przez 3n bitowy rejestr 3n-R-LFSR przez g-taktowe sekwencje niezależnie od rodzaju wylosowanego stanu początkowego. Potwierdza to rezultaty uzyskane przez autorów w pracy [8] dla rejestrów 2n-R-LFSR.

#### 5. Podsumowanie

Przedstawiono nową koncepcję wykrywania uszkodzeń dynamicznych typu przesłuchy w połączeniach w układach FPGA. Testowaniu poddaje się wyłącznie te połączenia, które będą wykorzystywane przez docelową aplikację, która ma zostać zrealizowana w układzie FPGA. Zaproponowano strukturę BIST w postaci rejestru pierścieniowego 3n-R-LFSR zapewniającą wygenerowanie par testowych pobudzających przesłuchy ze zbioru  $P = \{D_k, G_k\}$  dla  $k < 5$ . W celu przetestowania większej liczby połączeń niezbędnych jest przeprowadzenie kilku sesji testowania. W każdej z takich sesji wykorzystywana jest inna konfiguracja układu FPGA realizująca inną strukturę testera 3n-R-LFSR zapewniającą przetestowanie innego zestawu n połączeń.

Eksperymenty wykazały, że dla przesłuchów  $D_k$  oraz  $G_k$  gdzie  $k \ll n$  można znaleźć losowy stan początkowy gwarantujący, że generowany przez rejestr 3n-R-LFSR ciąg T o akceptowalnej długości g zawierać będzie 100 % par testowych niezbędnych do pobudzenia przesłuchów  $D_k$  oraz  $G_k$ . Udowodniono także, że sekwencje pobudzające przesłuchy  $D_k$  oraz  $G_k$  wykrywają również uszkodzenia statyczne i opóźnieniowe. Zdaniem autorów, ze względu na odczytywanie 3n bitowych sygnatur, gwarantujących wysoką rozdzielczość diagnostyczną, sekwencje te będą także umożliwiały identyfikację i lokalizację uszkodzeń statycznych i opóźnieniowych.

#### 6. Literatura

- [1] K. Shu-Min Li, C. Len Lee, C. Su, J. Chen: A Unified Approach to Detecting Crosstalk Faults of Interconnects in Deep Sub-Micron VLSI. ATS, str. 145-150, 2004.
- [2] X. Aragones, J.L. González, F. Moll and A. Rubio: Noise Generation and Coupling Mechanisms in Deep-Submicron ICs. IEEE Design & Test Computers, vol.19, no.5, str.27-35, 2002.
- [3] The International Technology Roadmap for Semiconductors, 2007, URL: <http://public.itrs.net/>
- [4] A. Jutman: At-Speed On-Chip Diagnosis of Board-Level Interconnect Faults. ETS, 2004.
- [5] B.Nadeau-Dostie: An Embedded Technique for At-Speed Interconnect Testing. ITC, str.431-438, 1999.
- [6] R. Pendurkar, A. Chatterjee, Y. Zorian: Switching Activity Generation with Automated BIST Synthesis for Performance Testing of Interconnects. IEEE Trans. CAD/ICS, str.20, n.9, 2001.
- [7] A. Attarha, M. Nourani: Testing Interconnects for Noise and Skew in Gigahertz SoC. ITC, str.305-314, 2001.
- [8] A. Hławiczka, K. Gucwa, T. Garbolino: Zastosowanie liniowych rejestrów pierścieniowych do testowania połączeń w układach FPGA. Pomiary Automatyka Kontrola vol. 54, nr 8/2008, str. 594-597.