

Katarzyna HRYŃKÓW-STATKIEWICZ  
Politechnika Śląska

## BADANIE SKUTECZNOŚCI METOD TESTOWANIA WIELOWARTOŚCIOWYCH UKŁADÓW CYFROWYCH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badania skuteczności testowania układów MVL, przy wykorzystaniu w procesie weryfikacji odpowiedzi zaproponowanych technik kompresji stratnej. Zaprezentowano opracowane wzory pozwalające na oszacowanie wartości prawdopodobieństwa maskowania uszkodzeń dla proponowanych technik, wyznaczając zależność maskowania od podstawy rozważanej logiki oraz - dla techniki liniowej - liczby stopni układu kompresji - dla technik nieliniowych - cech zliczeniowych ciągu badanego. Opracowano i zaimplementowano algorytmy potrzebne do realizacji proponowanego eksperymentu naukowego, badającego w warunkach symulacji komputerowej skuteczność użycia proponowanych technik kompresji w procesie weryfikacji wyników testu, w odniesieniu do przykładowych układów realizujących funkcje wielowartościowe.

## RESEARCH ON EFFICIENCY OF THE MULTIPLE-VALUED SYSTEMS TESTING

**Summary.** The article shows results of research on efficiency of the MVL systems testing with the application of suggested of compression techniques in the process of response verification. The conceived formulas enabling to estimate the value of faults masking probability for the suggested techniques have been presented. The dependence between masking and the basis of logic as well as, for the linear technique, the length of a compressor, whereas, for the non-linear techniques, a selected syndrome. The algorithms required for the realization of the scientific experiment have been conceived and implemented. By means of computer simulation, the efficiency of implementation of the suggested compression techniques has been assessed in the process of test results verification in reference to sample systems realizing multi-valued functions.

## 1. Charakterystyka problemu testowania binarnych układów cyfrowych

Testowanie układu cyfrowego jest procesem polegającym na obserwacji reakcji wyjść urządzenia poddanego pobudzeniu ściśle określoną, powtarzalną sekwencją sygnałów cyfrowych, w standardzie obowiązującym dla testowanego układu i porównaniu wyników tej obserwacji z wynikami charakterystycznymi dla układu poprawnego [10]. Metody testowania różnią się konstrukcją zbiorów pobudzeń testowych oraz sposobami weryfikacji odpowiedzi [7, 2]. Ich efektywność jest funkcją kosztów oraz czasu trwania procesu testowania.

W przypadku układów binarnych testowanie pseudoprzypadkowe z pseudolosowym generatorem testów oraz z kompresją wyników testowania okazało się interesującą alternatywą dla metod deterministycznych zarówno z punktu widzenia kosztów diagnozy, jak i szybkości testowania [1, 3, 4, 5, 8], co pozwala zakładać, że w przypadku zastosowania technik kompresji przy testowaniu układów o wyższych podstawach logiki wystąpią podobne relacje. Wynikiem poszukiwań skutecznych technik kompresji ciągów danych binarnych było opracowanie założeń technik kompresji nieliniowej: SC - syndrome counting – polegającej na zliczaniu wystąpień „1”, zliczaniu przejść TC – transition counting, oraz techniki kompresji liniowej analizy sygnatur [11, 7, 10, 6]. Wymienione techniki są punktem wyjścia dla opracowanych i prezentowanych w niniejszym artykule wzorów, które pozwalają na oszacowanie wartości prawdopodobieństwa maskowania uszkodzeń dla układów o wielowartościowej podstawie logiki.

## 2. Probabilistyczny model maskowania uszkodzeń dla układów o wielowartościowej podstawie logiki

### 2.1. Wielowartościowe układy logiczne

Wnioskowanie oparte na dwuwartościowej logice Arystotelesa oraz klasycznie pojmowanych zbiorach nie jest w stanie rozwiązać wielu sprzeczności i niejednoznaczności, jakie występują przy przetwarzaniu danych rzeczywistych. Logika wielowartościowa, będąca uogólnieniem logiki boolowskiej, zakłada istnienie więcej niż dwóch wartości logicznych. Pierwsze formalne systemy logiki wielowartościowej zostały opracowane przez polskiego logika Jana Łukasiewicza oraz amerykańskiego matematyka Emila Posta. Ważnym obszarem zastosowań logik wielowar-

tościowych są układy cyfrowe. W latach 70. zasygnalizowany został problem ograniczenia liczby połączeń w układach cyfrowych i w konsekwencji potrzeba zasadniczych zmian w istniejących koncepcjach związanych z projektowaniem, stabilnością i diagnostyką tych urządzeń. We współczesnych binarnych układach cyfrowych większa część kosztów produkcji przeznaczana jest na wykonanie połączeń wewnętrznych; zajmują one ponad 70% powierzchni półprzewodnika. Możliwość zwiększenia liczby poziomów sygnałów w układach scalonych pozwoliłaby rozwiązać ten problem. Postęp w produkcji elementów półprzewodnikowych, umożliwiający praktyczną realizację elementów wielowartościowych, doprowadził w ostatnich latach do intensyfikacji badań nad wielowartościowymi układami logicznymi oraz powstania wielu eksperymentalnych realizacji sprzętowych związanych głównie z wielostanowymi pamięciami [12]. Jeżeli chodzi o dalszy rozwój badań w dziedzinie zastosowań logiki wielowartościowej do budowy układów Multi Valued Logic, to zmierzają one w kierunku: opracowania wielowartościowych modułów będących podsystemami dużych systemów binarnych, budowy systemu wykorzystującego równocześnie wiele logik o różnych podstawach oraz opracowania efektywnych konwerterów binarno-wielowartościowych. W świetle aktualnych badań niezwykle istotnym i ważnym zagadnieniem jest opracowanie skutecznych metod testowania układów zrealizowanych w logice wielowartościowej [9, 12]. Zakłada się, że proponowane techniki kompresji nieliniowej i modyfikacja techniki liniowej analizy sygnatur mogą być skutecznym narzędziem w procesie testowania układów MVL.

## 2.2. Cechy probabilistyczne technik kompresji

Ogólna postać prawdopodobieństwa błędu jest określona przez wzór (2.1) [7]:

$$P = \frac{\sum_i l_i - 1}{\sum_j l_j - 1} \quad (2.1)$$

gdzie licznik oznacza licznosc zbioru zdarzen sprzyjajacych, a mianownik licznosc przestrzeni zdarzen. Przestrzen ciagow stanowi zbior wszystkich ciagow, ktore moga potencjalnie wystapic na wyjsciu badanego ukkladu. Przestrzen zdarzen to zbior wszystkich potencjalnie mozliwych ciagow roznych od ciagu poprawnego. Zbior zdarzen sprzyjajacych zawiera te ciagi, ktore w wyniku kompresji stratnej przekształcane sa w identyczna postac finalna, zgodna z wzorcowa i rozne sa

od ciągu poprawnego. Liczność zbioru zdarzeń sprzyjających jest funkcją zastosowanego typu kompresji.

Proponowane metody kompresji stratnej ciągów informacji wielowartościowej jako punkt wyjścia zakładają całkowitą przestrzeń ciągów o licznosci  $v^m$ , gdzie  $m$  oznacza długość badanego ciągu, a  $v$  jest podstawą rozważanej logiki. Zakłada się, że proponowane techniki mogą być skutecznym narzędziem w testowaniu cyfrowych układów o wielowartościowej podstawie logiki.

### 2.2.1. Kompresja ciągów informacji wielowartościowej metodą analizy sygnatur

Punktem wyjściowym opracowania wzoru pozwalającego na oszacowanie wartości prawdopodobieństwa maskowania uszkodzeń dla metody liniowej w układach logiki wielowartościowej były opracowania dotyczące stosowania tej techniki w przypadku kompresji danych binarnych. Wzór (2.2) pozwala na obliczenie wartości prawdopodobieństwa maskowania uszkodzeń w układach binarnych [7]:

$$P_{AS} = \frac{2^{m-n} - 1}{2^m - 1} \quad (2.2)$$

gdzie:  $m$  - długość ciągu testowego,

$n$  - ilość pozycji przeznaczonych na kodowanie sygnatury.

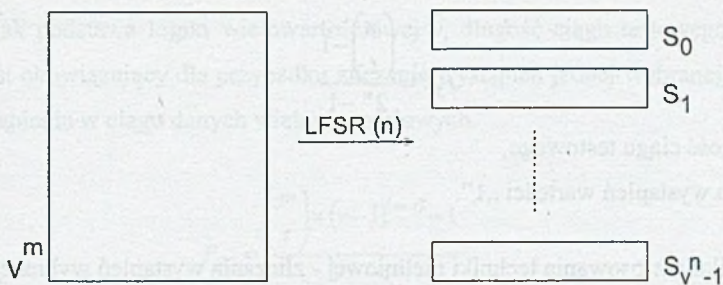
Zakładając, że  $m \gg n$  można przyjąć [7]

$$P_{AS} \rightarrow 2^{-n} \quad (2.3)$$

W przypadku użycia techniki liniowej do kompresji ciągów informacji wielowartościowej przestrzeń wszystkich możliwych ciągów wejściowych zostaje równomiernie podzielona na równoliczne podzbiory o identycznej sygnaturze. Przyporządkowanie sygnatury do określonego podzbioru jest dla danego wielomianu sprzężenia zwrotnego wzajemnie jednoznaczne. Na podstawie analizy podziału przestrzeni ciągów oszacowano licznosc podzbioru ciągów charakteryzujących się identycznym wynikiem. Jeżeli liczba stopni układu kompresji wynosi  $n$ , podstawa rozważanej logiki jest równa  $v$ , to licznosc podzbioru ciągów o identycznej sygnaturze wyraża się wzorem:

$$\frac{v^m}{v^n} \quad (2.4)$$

Podział przestrzeni ciągów ilustruje rys. 1.



Rys. 1. Podział przestrzeni ciągów przy zastosowaniu techniki liniowej o liczbie stopni kompresora równej  $n$  do kompresji ciągów informacji wielowartościowej

Fig. 1. Division of the sets of strings basing on linear technique for compression of multi-valued data

Poniżej przedstawiono autorski wzór (2.5), pozwalający na oszacowanie wartości prawdopodobieństwa maskowania uszkodzeń w przypadku stosowania metody analizy sygnatur. Wyznaczono zależność maskowania od liczby poziomów logicznych mogących wystąpić w badanym ciągu, długości ciągu oraz ilość pozycji przeznaczonych na kodowanie sygnatury.

$$P_{AS} = \frac{v^{m-n} - 1}{v^m - 1} \quad (2.5)$$

gdzie:  $v$  - podstawa logiki wielowartościowej,

$m$  - długość ciągu testowego,

$n$  - ilość pozycji przeznaczonych na kodowanie sygnatury.

Zakładając, że  $m \gg n$  można przyjąć

$$P_{AS} \rightarrow v^{-n} \quad (2.6)$$

Z postaci otrzymanego wzoru (2.6) wynika, że wartość prawdopodobieństwa maskowania dla danej wartości logiki jest wartością stałą  $i$  – co wydaje się szczególnie interesujące – zmniejsza się wraz ze zwiększaniem podstawy logiki badanego układu cyfrowego.

### 2.2.2. Kompresja ciągów informacji wielowartościowej metodą nieliniową zliczania liczby wystąpień wybranej wartości – occurrence counting

Poniższy wzór (2.7) pozwala na obliczenie wartości prawdopodobieństwa maskowania uszkodzeń dla układów binarnych, w przypadku stosowania techniki SC (syndrome counting) zliczania liczby wystąpień „1” [7]. Stanowi on punkt wyjściowy opracowania założeń odnośnie do stosowania tej metody dla kompresji stratnej ciągów danych wielowartościowych.

$$P_{SC} = \frac{\binom{m}{t} - 1}{2^m - 1} \quad (2.7)$$

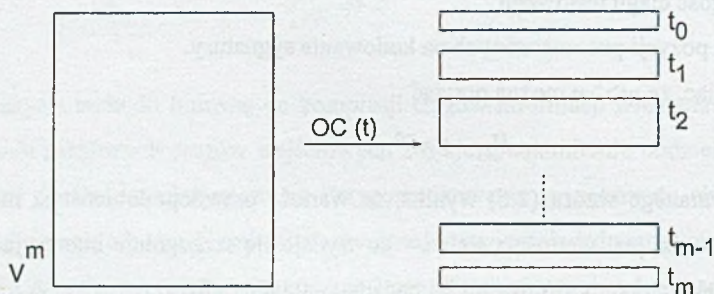
gdzie:  $m$  - długość ciągu testowego,

$t$  - liczba wystąpień wartości „1”.

W wyniku zastosowania techniki nieliniowej - zliczania wystąpień wybranej wartości - do kompresji informacji wielowartościowej, przestrzeń wszystkich możliwych ciągów wejściowych zostaje nierównomiernie podzielona na różnoliczne podzbiory o identycznej cesze. Przyporządkowanie zliczanej cechy do określonego podzbioru jest wzajemnie jednoznaczne. Na podstawie analizy podziału przestrzeni ciągów oszacowano licznosc podzbioru ciągów charakteryzujących się identycznym wynikiem. Jeżeli  $t$  jest liczbą wystąpień wartości poddanej zliczaniu,  $v$  jest podstawą logiki wielowartościowej, a  $m$  długością ciągu testowego, to licznosc podzbioru wyraża zależność:

$$\binom{m}{t} \times (v-1)^{(m-t)} \quad (2.8)$$

Podział przestrzeni ciągów ilustruje rys. 2.



Rys. 2. Podział przestrzeni ciągów przy zastosowaniu techniki nieliniowej zliczania liczby wystąpień wybranej wartości w ciągu informacji wielowartościowej

Fig. 2. Division of the sets of strings basing on OC technique for compression of multi-valued data

Opracowano wzór (2.9) pozwalający na oszacowanie wartości prawdopodobieństwa maskowania uszkodzeń dla metody OC - occurrence counting, zliczania wystąpień wybranego poziomu logicznego. Podany wzór przedstawia zależności między takimi cechami ciągu wielowar-

tościowego, jak podstawa logiki wielowartościowej  $v$ , długość ciągu testowego  $m$  oraz liczba zdarzeń  $t$  i jest obowiązujący dla przypadku zliczania wystąpień jednej wybranej wartości, możliwej do wystąpienia w ciągu danych wielowartościowych.

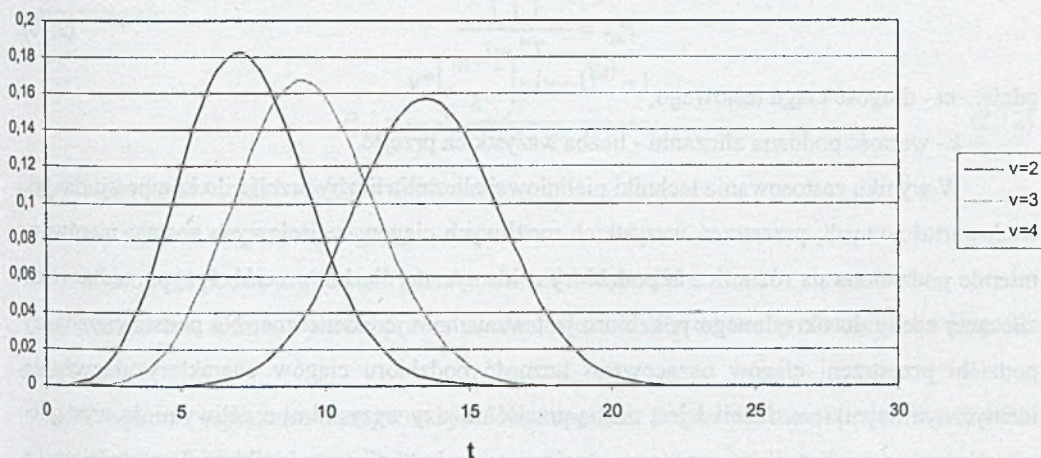
$$P_{OC} = \frac{\binom{m}{t} \times (v-1)^{(m-t)} - 1}{v^m - 1} \quad (2.9)$$

gdzie:  $v$  - podstawa logiki wielowartościowej,

$m$  - długość ciągu testowego,

$t$  - liczba wystąpień wartości poddanej zliczaniu - liczba zdarzeń.

Na rys. 3 w formie wykresu przedstawiono zależność  $P_m$  od liczby zdarzeń  $t$  dla długości ciągu  $m=25$ .



Rys. 3. Wykres funkcji maskowania w dziedzinie cech zliczeniowych ciągu poddanego kompresji techniką OC, uwzględniający przyjętą podstawę logiki oraz długość sekwencji wyjściowej

Fig. 3. Graph of masking function using OC technique in syndrome domain. Dependence between  $P_m$  and syndrome  $t$  with  $m$ -length=25

Z wykresu zaprezentowanego na rys. 3 wynika, że funkcja  $P_m$  nie jest funkcją symetryczną, jak dla odmiany tej techniki zastosowanej do kompresji ciągów binarnych. Wynika to bezpośrednio ze zmodyfikowanej postaci licznika wzoru (2.9). Wartość  $P_m$  zależy od liczby wystąpień wartości poddanej zliczaniu i jest maksymalna, gdy obserwowana cecha  $t = m \text{ div } v$ . Maksymalna możliwa wartość  $P_m$  wzrasta wraz ze wzrostem podstawy logiki  $v$ . Im dłuższy ciąg wyjściowy poddany kompresji (większe  $m$ ), tym maksymalna wartość prawdopodobieństwa maskowania jest mniejsza.

### 2.2.3. Kompresja ciągów informacji wielowartościowej metodą nieliniową zliczania przejść - counting of changes

Poniższy wzór (2.10) pozwala na obliczenie wartości prawdopodobieństwa maskowania uszkodzeń w układach binarnych, w przypadku stosowania techniki zliczania przejść TC – transition counting [7], i jest punktem wyjściowym do opracowania założeń odnośnie do stosowania tej techniki do kompresji ciągów danych wielowartościowych.

$$P_{sc} = \frac{2 * \binom{m}{t} - 1}{2^m - 1} \quad (2.10)$$

gdzie:  $m$  - długość ciągu testowego,

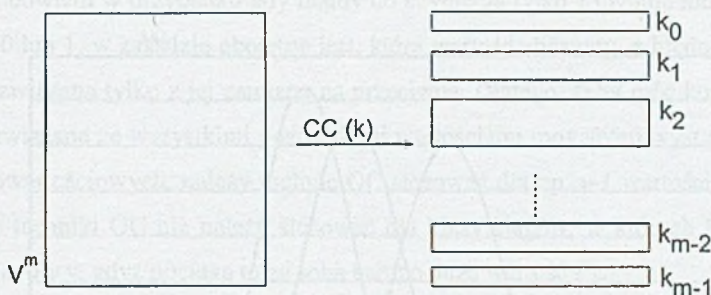
$k$  - wartość poddana zliczaniu - liczba wszystkich przejść.

W wyniku zastosowania techniki nieliniowej zliczania liczby przejść do kompresji danych wielowartościowych, przestrzeń wszystkich możliwych ciągów wejściowych zostaje nierównomiernie podzielona na różniczne podzbiory o identycznej liczbie przejść. Przyporządkowanie zliczanej cechy do określonego podzbioru jest wzajemnie jednoznaczne. Na podstawie analizy podziału przestrzeni ciągów oszacowano licznosc podzbioru ciągów charakteryzujących się identycznym wynikiem. Jeżeli  $k$  jest liczbą przejść między wszystkimi możliwymi do wystąpienia w kompresowanym ciągu poziomami logicznymi,  $v$  jest podstawą logiki wielowartościowej a  $m$  - długością ciągu testowego, to licznosc podzbioru wyraża się wzorem:

$$v * \binom{m-1}{k} \times (v-1)^{(k)} \quad (2.11)$$



Podział przestrzeni ciągów ilustruje rys. 4.



Rys. 4. Podział przestrzeni ciągów przy zastosowaniu techniki nieliniowej zliczania liczb przejść między wszystkimi możliwymi poziomami logicznymi w ciągu wyjściowym

Fig. 4. Division of the sets of strings basing on CC technique for compression of multi-valued data

Poniżej w postaci autorskiego wzoru (2.12) przedstawiono zależności między takimi cechami ciągu wielowartościowego, jak: podstawa logiki wielowartościowej  $v$ , długość ciągu testowego  $m$  oraz liczba przejść  $k$ , dla przypadku stosowania techniki nieliniowej – CC (counting of changes) zliczania przejść między wszystkimi poziomami logicznymi ciągu danych wielowartościowych.

$$P_{CC} = \frac{v * \binom{m-1}{k} \times (v-1)^{(k)} - 1}{v^m - 1} \quad (2.12)$$

gdzie:  $v$  - podstawa logiki wielowartościowej,

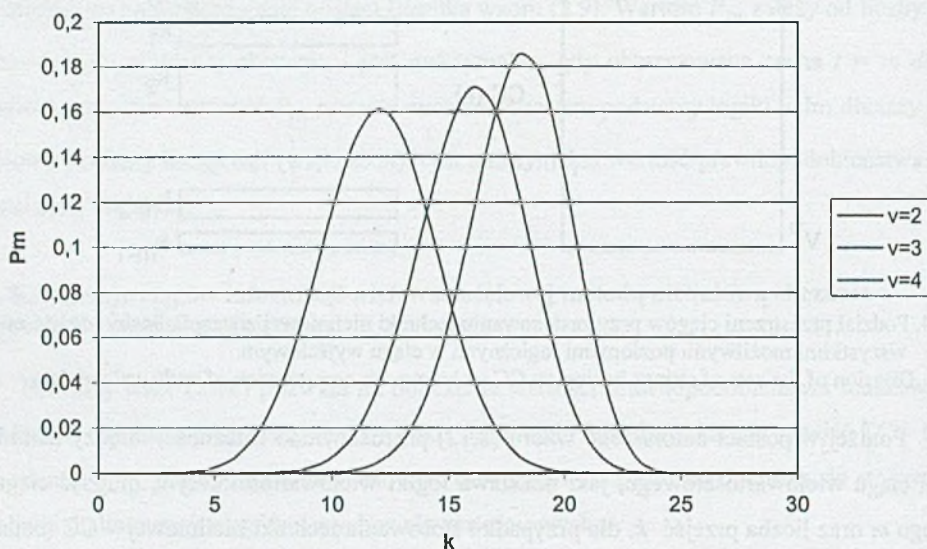
$m$  - długość ciągu testowego,

$k$  - wartość poddana zliczaniu - liczba wszystkich przejść.

Na rys. 5 w formie wykresu przedstawiono zależność  $P_m$  od liczby zdarzeń  $k$  dla długości ciągu  $m=25$ .

Z wykresu zaprezentowanego na rys. 5 wynika, że w przypadku metody nieliniowej CC - counting of changes, postać funkcji  $P_m$  jest inna niż przy zastosowaniu odmiany tej techniki do badania ciągów binarnych. Wynika to bezpośrednio ze zmodyfikowanej postaci licznika wzoru (2.12). Maksymalna wartość  $P_m$  występuje, gdy obserwowana cecha - liczba przejść -  $k = m - (m \text{ div } v) + 1$ . Maksymalna możliwa wartość  $P_m$  wzrasta wraz ze wzrostem podstawy logiki. Im

dłuższy ciąg wyjściowy poddany kompresji, tym wartość prawdopodobieństwa maskowania jest mniejsza.



Rys. 5. Wykres funkcji maskowania w dziedzinie cech zliczeniowych ciągu poddanego kompresji techniką CC, uwzględniający przyjętą podstawę logiki oraz długość sekwencji wyjściowej

Fig. 5. Graph of masking function using CC technique in syndrome domain. Dependence between  $P_m$  and syndrome  $k$  with  $m$ -length=25

### 2.3. Zasady stosowania metody liniowej i metod zliczeniowych w układach MVL

Konsekwencją cech probabilistycznych technik kompresji informacji wielowartościowej jest przyporządkowanie ich do klas ciągów ze względu na wartość prawdopodobieństwa maskowania uszkodzeń. Aby zminimalizować możliwość błędnego oszacowania stanu badanego wielowartościowego układu cyfrowego, rozumianą jako zapewnienie maksymalnej wykrywalności uszkodzeń dla układów MVL, pożądane jest, aby:

- metodę liniową stosować dla klas ciągów informacji wielowartościowej, dla których wartość prawdopodobieństwa maskowania dla metod zliczeniowych jest większa niż dla metody liniowej. Ze wzorów (2.5) (2.9) (2.12) wynika, że technikę liniową należy stosować dla klasy ciągów, dla których nie jest zalecane stosowanie technik zliczeniowych,
- w przypadku metody OC - occurrence counting, należy wziąć pod uwagę fakt, że zliczając jedną wybraną wartość osiąga się możliwość wykrycia tylko przekłamań w ciągu wyjścio-

wym związanych ze zmianą obserwowanej wartości. W układach binarnych ten problem nie występuje, bowiem w przypadku gdy mamy do czynienia tylko z dwoma możliwymi wartościami, tj. 0 lub 1, w zasadzie obojętne jest, którą wartość zliczamy, a błędna pozycja ciągu może być związana tylko z jej zamianą na przeciwną. Dlatego, żeby móc kontrolować przekłamania związane ze wszystkimi pozostałymi wartościami mogącymi wystąpić w ciągu danych wielowartościowych, należy metodę OC stosować dla np.  $\nu-1$  wartości. Z wzoru (2.9) wynika, że techniki OC nie należy stosować dla klasy ciągów, w których liczba zdarzeń  $t$  równa jest  $m \text{ div } \nu$ , gdyż pociąga to za sobą bardzo dużą wartość  $P_m$ .

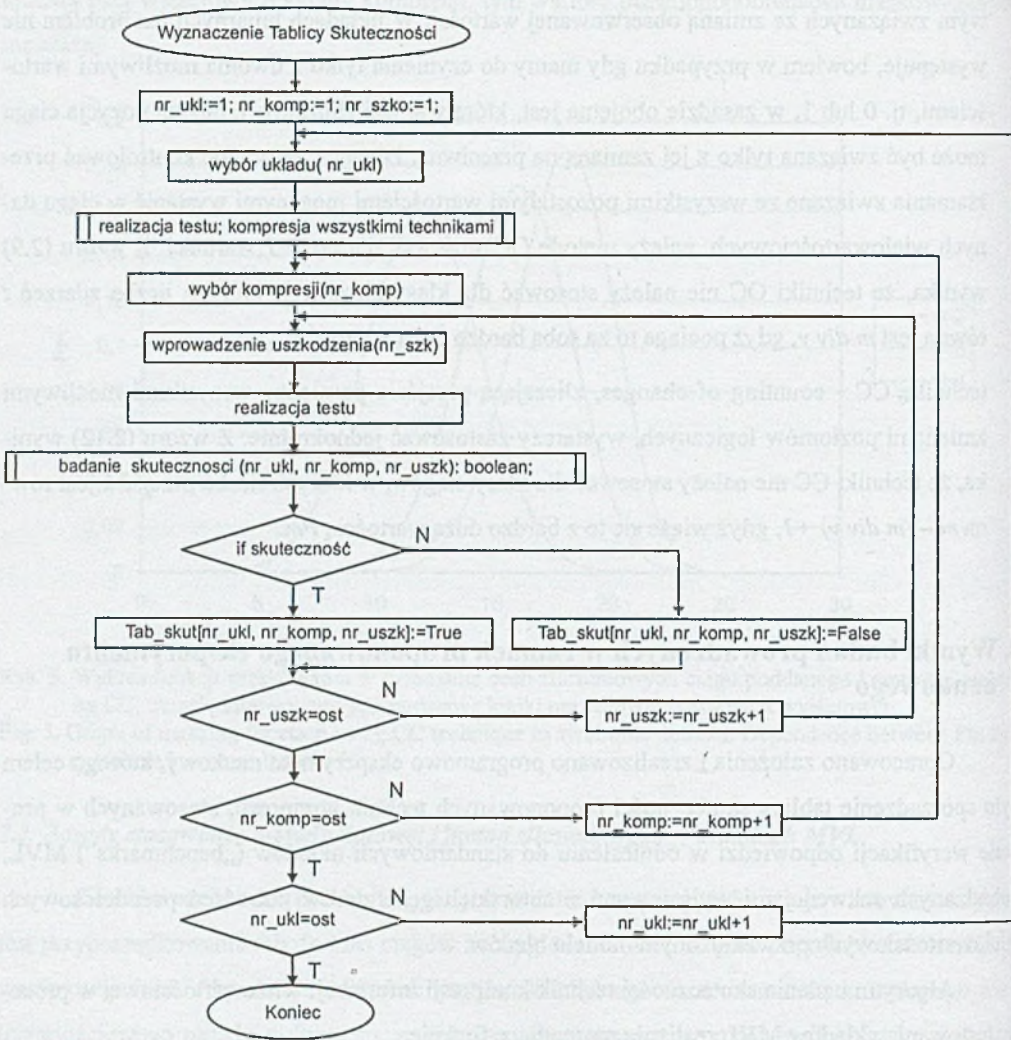
- technikę CC - counting of changes, zliczającą przejścia pomiędzy wszystkimi możliwymi zmianami poziomów logicznych, wystarczy zastosować jednokrotnie. Z wzoru (2.12) wynika, że techniki CC nie należy stosować dla klasy ciągów, w których liczba przejść  $k$  jest równa  $m - (m \text{ div } \nu) + 1$ , gdyż wiąże się to z bardzo dużą wartością  $P_m$ .

### 3. Wyniki badań prowadzonych w ramach proponowanego eksperymentu naukowego

Opracowano założenia i zrealizowano programowo eksperyment naukowy, którego celem było sporządzenie tablicy skuteczności proponowanych technik kompresji, stosowanych w procesie weryfikacji odpowiedzi w odniesieniu do standardowych układów („benchmarks”) MVL, pobudzanych sekwencjami wyjściowymi z autorskich generatorów pobudzeń pseudolosowych wielowartościowych przy założonym modelu błędów.

Algorytm badania skuteczności technik kompresji informacji wielowartościowej w procesie testowania układów MVL realizuje następujące funkcje:

1. Wybór (kolejnego) układu do testowania.
2. Określenie podstawy logiki.
3. Wyznaczenie testu.
4. Realizacja testu.
5. Wprowadzenie (kolejnych z zadanego katalogu) uszkodzenia.
6. Realizacja testu dla wszystkich technik testowania.
7. Sporządzenie tablicy skuteczności poszczególnych technik dla konkretnych układów i uszkodzeń.



Rys. 6. Algorytm badania skuteczności technik kompresji informacji wielowartościowej w procesie testowania układów MVL

Fig. 6. Algorithm of efficiency analysis of MVL information compression technique in MVL-testing process

### 3.1. Analiza skuteczności poszczególnych technik kompresji

Celem badań było porównanie skuteczności proponowanych technik kompresji. Badane układy zostały pobudzone wielowartościową sekwencją pseudolosową. Odpowiedzi testowanych

układów zostały poddane kompresji proponowanymi technikami, zapamiętane i w kolejnym kroku eksperymentu wykorzystane do porównywania z wynikami kompresji układów, w których kolejno zasymulowano wystąpienie wszystkich - z założonej klasy - błędów logicznych.

Na podstawie wyniku tego porównania dokonano oceny przydatności poszczególnych technik kompresji w procesie testowania przykładowych układów wielowartościowych. Przeprowadzony eksperyment dotyczył układów o trójwartościowej logice. Przeprowadzono 105 badań skuteczności poszczególnych technik kompresji. Liczba 105 wynika z liczby badanych układów - 4, liczby ich linii wewnętrznych oraz podstawy logiki implikującej liczbę wystąpień możliwych błędów przy wybranym modelu uszkodzeń.

W procesie weryfikacji odpowiedzi wykorzystano rejestr liniowy o takich samych parametrach jak rejestr wykorzystany w procesie generacji sekwencji stymulujących badany układ (taka sama liczba przerzutników i postać wielomianu pierwotnego). Następnie przeprowadzono szereg eksperymentów, w których do generowania sekwencji testującej używano „wymaganej” dla danego układu liczby przerzutników (równej liczbie wejść układu), natomiast w procesie weryfikacji używano rejestru liniowego z inną, mniejszą liczbą przerzutników. Uzyskane wyniki dotyczące skuteczności testowania techniką liniową przedstawiono na rys.7.

Tabela 1

Skuteczność techniki liniowej stosowanej w procesie testowania przykładowych układów, o podstawie logiki równej 3, w funkcji liczby przerzutników kompresora

Liczba przerzutników rejestru kompresora	Liczba poprawnej diagnozy	Liczba niepoprawnej diagnozy	Skuteczność [%]
= m (liczba wejść układu)	98	7	93,33
6	98	7	93,33
5	104	1	99,05
4	101	4	96,19
3	48	57	45,71
2	48	57	45,71

W kolejnym kroku badań w procesie weryfikacji odpowiedzi testowanych układów użyto techniki zliczania liczby wystąpień wybranej wartości logicznej. Przy przyjętej podstawie logiki układu równej 3 są to techniki: zaliczania liczby wystąpień wartości 0, zliczania liczby wystąpień wartości 1 oraz technika zliczania liczby wystąpień wartości 2. Uzyskane wyniki dotyczące skuteczności testowania techniką OC przedstawiono na rys. 8.

Tabela 2

Skuteczność techniki OC stosowanej w procesie testowania przykładowych układów, o podstawie logiki równej 3

Metoda nieliniowa	Liczba poprawnej diagnozy	Liczba niepoprawnej diagnozy	Skuteczność [%]
zliczanie 0	89	16	84,76
zliczanie 1	93	12	88,57
zliczanie 2	50	55	47,62

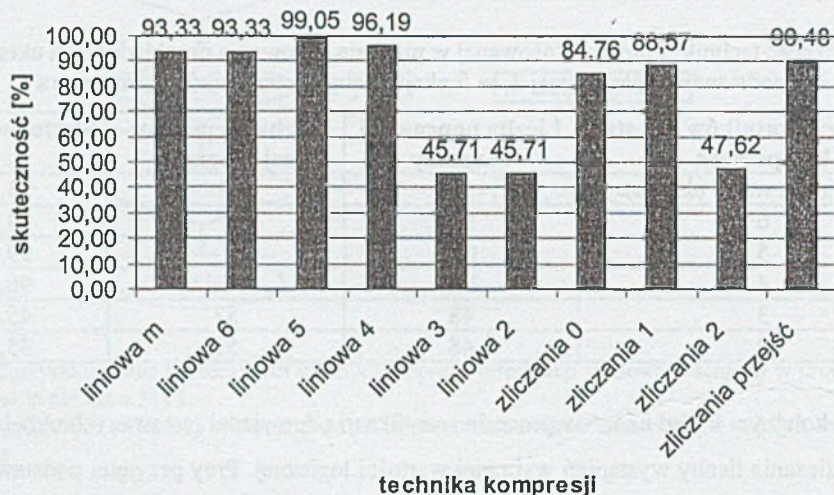
Ostatnim etapem eksperymentu było przeprowadzenie symulacji programowej, w której w procesie kompresji odpowiedzi testowanych układów zastosowano technikę zliczania przejść między wszystkimi możliwymi do wystąpienia poziomami logicznymi, tj.: 0-1, 0-2, 1-0, 1-2, 2-0, 2-1. Uzyskane wyniki dotyczące skuteczności testowania techniką OC przedstawiono na rys. 9.

Tabela 3

Skuteczność techniki zliczania przejść, stosowanej w procesie testowania przykładowych układów, o podstawie logiki równej 3

Metoda nieliniowa	Liczba poprawnej diagnozy	Liczba niepoprawnej diagnozy	Skuteczność [%]
Zliczania przejść	95	10	90,48

Na rys. 10. zaprezentowano uzyskane wyniki w formie wykresu.



Rys. 7. Wykres skuteczności techniki liniowej dla różnych długości rejestru oraz technik zliczeniowych stosowanych w procesie testowania przykładowych układów realizujących funkcje trójwartościowe

Fig. 7. Linear technique efficiency graph with miscellaneous registry length and non-linear techniques applied in the process of tri-valued realizing sample systems testing

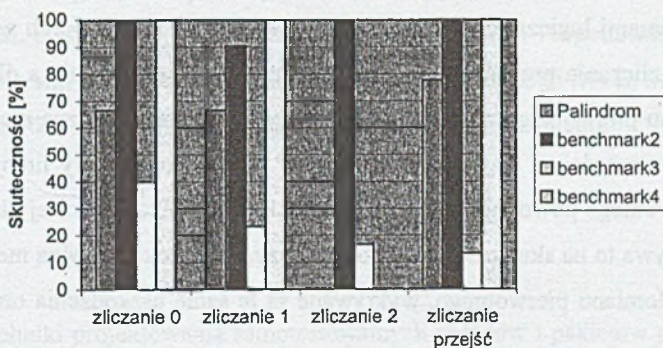
Przeprowadzono badania skuteczności testowania poszczególnych, zaimplementowanych układów, przy użyciu w procesie kompresji odpowiedzi układu technik nieliniowych w celu dokładniejszej analizy danych. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 11.

Tabela 4

Skuteczność techniki zliczania przejść, stosowanej w procesie testowania przykładowych układów, o podstawie logiki równej 3

Testowany układ	technika kompresji	Liczba poprawnej diagnozy	Liczba niepoprawnej diagnozy	Skuteczność [%]
palindrom	zliczanie 0	12	6	66,67
palindrom	zliczanie 1	12	6	66,67
palindrom	zliczanie 2	0	18	0,00
palindrom	zliczanie przejść	14	4	77,78
benchmark2	zliczanie 0	21	0	100,00
benchmark2	zliczanie 1	19	2	90,48
benchmark2	zliczanie 2	21	0	100,00
benchmark2	zliczanie przejść	21	0	100,00
benchmark3	zliczanie 0	20	10	66,67
benchmark3	zliczanie 1	26	4	86,67
benchmark3	zliczanie 2	29	1	96,67
benchmark3	zliczanie przejść	24	6	80,00
benchmark4	zliczanie 0	36	0	100,00
benchmark4	zliczanie 1	36	0	100,00
benchmark4	zliczanie 2	0	36	0,00
benchmark4	zliczanie przejść	36	0	100,00

Na rys. 12 w formie wykresu zaprezentowano otrzymane wyniki.



Rys. 8. Wykres skuteczności technik zliczeniowych stosowanych dla poszczególnych układów, przy przyjętej podstawie logiki równej 3

Fig. 8. Non-linear technique efficiency graph applied for particular systems based on tri-valued logic basis

Analizując otrzymane dane, należy zwrócić uwagę na małą skuteczność metody zliczania wystąpienia wartości 2. Wynika to bezpośrednio z faktu, że wśród 4 badanych układów, dwa realizują funkcje, w wyniku których na wyjściu nie może się pojawić wartość 2. Technika zliczania przejdzie między wszystkimi możliwymi wartościami zapewnia lepsze właściwości diagnostyczne niż metoda zliczania cechy, co wynika z założeń dotyczących jej stosowania; w eksperymencie zliczano przejścia między wszystkimi możliwymi poziomami logicznymi, których w ciągu trójwartościowym jest więcej niż w binarnym. Zgodnie z przewidywaniami, najlepsze właściwości diagnostyczne zapewnia metoda liniowa, podobnie jak to występuje w przypadku układów binarnych i dopiero przy użyciu w procesie kompresji rejestru o długości równej 3 uzyskano skuteczność metody liniowej mniejszą od skuteczności najlepszego wariantu metody nieliniowej, mianowicie techniki zliczania przejść. Brak 100% skuteczności techniki liniowej może wynikać z istniejących uszkodzeń niewykrywalnych lub z nieoptymalnego doboru parametrów rejestru kompresora tj. liczby przerzutników rejestru oraz postaci sprzężenia pierwotnego. Na tym etapie badań z analizy danych wynika że najskuteczniejsza jest metoda liniowa, w której do kompresji używa się rejestru o długości równej 5.

### ***3.2. Analiza wpływu postaci wielomianu pierwotnego rejestru generatora na właściwości detekcyjne technik kompresji***

Dla różnych sprzężeń pierwotnych generowane są sekwencje testujące w różnej kolejności, co jak zauważono, wpływa na skuteczność metody nieliniowej zliczania przejść między wszystkimi poziomami logicznymi. Oznacza to, że w przypadku niektórych wielomianów pierwotnych metoda zliczania przejść skutecznie wykrywa dane uszkodzenie a dla niektórych nie. Postać wielomianu pierwotnego nie wpływa na skuteczność diagnostyczną metod zliczania wystąpień wybranej wartości w ciągu wyjściowym. W przypadku metody liniowej różna postać wielomianu pierwotnego powoduje inną postać sygnatury charakterystycznej dla układu poprawnego, ale nie wpływa to na skuteczność detekcyjną, czy nawet lokalizacyjną metody. Bez względu na postać wielomianu pierwotnego, wykrywane są te same uszkodzenia oraz te same nie są wykrywane.



## 4. Wnioski

Opracowane wzory, pozwalające na oszacowanie wartości prawdopodobieństwa maskowania uszkodzeń dla proponowanych technik kompresji stratnej ciągów informacji wielowartościowej, są punktem wyjściowym do zbadania ich skuteczności w procesie testowania układów wielowartościowych. Dokonano porównania i oceny – opierając się na opracowanych wzorach - zaproponowanych sposobów kompresji oraz podano teoretyczne założenia odnośnie do ich stosowania. Przeprowadzone symulacje potwierdzają opracowane w pkt. 2.3 wytyczne dotyczące stosowania proponowanych technik kompresji stratnej. Na tym etapie badań najskuteczniejszą techniką kompresji ciągów informacji wielowartościowej, a użytą w procesie testowania układów MVL, jest metoda analizy sygnatur. Dalsze prace będą dotyczyły opracowania struktury testującej opartej na technice analizy sygnatur, która dla danego katalogu uszkodzeń i dla danego katalogu układów wielowartościowych umożliwi ich poprawną diagnostykę oraz opracowania koncepcji zastosowania struktury testującej w konfiguracji testowania wbudowanego oraz brzegowej ścieżki sterująco-obszernościowej, co pozwoli na niezależnienie skuteczności proponowanej struktury diagnostycznej od funkcji realizowanej przez testowane układy wielowartościowe. W świetle aktualnych badań nad systemami wielowartościowymi diagnoza i testowanie układów MVL jest ważnym zagadnieniem. Znalazienie skutecznych metod kompresji informacji wielowartościowej pozwoli na ich zastosowanie w praktyce, czego wynikiem będzie obniżenie kosztów i redukcja czasu pracy przy zachowaniu dużej efektywności metody. Jest to ważna alternatywa dla metod deterministycznych, prezentowanych w przedmiotowej literaturze. Proponowane techniki mogą potencjalnie stać się silnym narzędziem wykorzystanym w technologii MVL, zwłaszcza że autor opracowania nie spotkał się z pracami dotyczącymi rozważanego problemu.

## LITERATURA

1. Badura D.: Techniki projektowania samotestowalnych układów i pakietów cyfrowych wykorzystujące rejestry szeregowo z nieliniowym sprzężeniem zwrotnym. Uniwersytet Śląski, Katowice 1999.

2. Hedke Rolf: Systemy mikroprocesorowe. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987.
3. Hławiczka A.: Testowanie i projektowanie łatwo testowalnych układów i pakietów cyfrowych. Skrypty uczelniane nr 1586, cz. I, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 1990.
4. Hławiczka A.: Testowanie i projektowanie łatwo testowalnych układów i pakietów cyfrowych. Skrypty uczelniane nr 1788, cz. II, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 1990.
5. Hławiczka A., Mitas A., Ostas P., Saltarski R.: Analizatory sygnatur. Poradnik dla użytkownika. Skrypty uczelniane nr 1706, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 1993.
6. Kubiś M.: Elektronizacja. WKiŁ, Warszawa 1984.
7. Mitas A.: Zwiększanie skuteczności wykrywania uszkodzeń metodami kompresji ciągów. Pol. Śl., Gliwice 1988. Praca doktorska.
8. Mitas A.: Optymalizacja kompresji informacji w pseudoprzyypadkowym testowaniu układów cyfrowych. „Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji” 1999, 45, z. 3-4, ss.393-403.
9. Rine D.C.: Computer Science and Multiple-Valued Logic. Theory and Applications. Elsevier Science Publishers B.V. The Netherlands 1991.
10. Sapiecha K., Nowicki M.: Wykrywanie uszkodzeń w układach i systemach cyfrowych. WPW, Warszawa 1983.
11. Sowiński A.: Automatyczne testowanie w mikroelektronice. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1991.
12. Yanushkevitch S.: Logic Differential Calculus in Multi-Valued Logic Design. Szczecin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej. Institute of Computer Science & Information Systems, Technical University of Szczecin, Szczecin 1997.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Jan PIECHA

Wpłynęło do Redakcji dnia 04 lutego 2003 r.

## Abstract

The formulas, conceived to assess the value of probability of fault masking for compression of multi-valued information strings, pose a basis for estimating their efficiency in the proc-

ess of multi-valued systems testing. The suggested compression methods have been compared and assessed and theoretical assumption on their application have been presented. The simulation confirm the assumptions concerning the application of suggested compression techniques. At this stage, the signature analysis method applied in the MVL systems testing, seems to be the most efficient one. Future research will aim at conceiving testing structure based on the linear technique, which, for a certain faults model and sample MVL systems, will ensure their correct diagnosis. It will also cover the concept of application of the testing structure in the BIST and boundary scan-path configurations. The diagnosis and testing of the MVL systems is crucial on the background of current research on the MVL systems. Establishing of efficient multi-valued information compression methods, will enable to put them into practice, which will result in decreasing costs and testing duration with simultaneous preservation of high efficiency of the method. It constitutes an important alternative for deterministic methods presented in related literature. The suggested techniques may pose a powerful tool applied in the MVL technology, especially that the author has not come across any dissertations on the examined problem.