

Ireneusz MROZEK¹
Vyacheslav YARMOLIK¹

WIELOPRZEBIEGOWE TESTY KROKOWE PAMIĘCI RAM

Tradycyjne testy pamięci oparte o pojedynczy przebieg posiadają stałą i dość niską wydajność w odniesieniu do uszkodzeń uwarunkowanych zawartością (PSF). Celem zwiększenia tej wydajności stosuje się m.in. testowanie wieloprzebiegowe w których ten sam test bazowy realizowany jest wielokrotnie przy zmienianych warunkach początkowych. W artykule uwaga skupiona zostanie na porównaniu różnych testów krokowych i możliwości ich wykorzystania w technice testowania wieloprzebiegowego. Porównanie to oparte będzie o zdefiniowany współczynnik ważonej wydajności testów pozwalający w bardziej obiektywny sposób określić wydajność testu.

MULTIRUN MARCH TESTS FOR RAM

Conventional memory tests based on only one run have constant and low faults coverage especially for Pattern Sensitive Faults (PSF). To increase faults coverage the multiple run March test algorithms have been used. This article will focus mainly on the comparison of different tests and the possibility of their use in the multiple run memory tests technique. This comparison will be based on the defined Weighted Fault Coverage measure for March Test. It allows to us in a more objective way to determine test performance.

1. WSTĘP

Jednym z najbardziej widocznych dzisiaj przejawów gigantycznego postępu naukowo-technicznego jest stopień rozwoju elektroniki cyfrowej. Jednym z efektów tego rozwoju, a może bardziej jego przyczyną, jest wciąż rosnące zapotrzebowanie na szeroko rozumiane systemy cyfrowe. Nierozdzielnie z elektroniką cyfrową związane są pamięci półprzewodnikowe DRAM, SRAM, ROM, EPROM itd. Praktyka pokazuje, iż pamięć zajmuje ponad 50% całej powierzchni krzemowej układu SoC (ang. System on a Chip), a prognozuje się, iż w najbliższym czasie wielkość ta wzrośnie do 90% [1]. Statystycznie około 70% wszystkich uszkodzeń w systemach cyfrowych spowodowane jest uszkodzeniami pamięci.

¹Politechnika Białostocka, Wydział Informatyki, 15-351 Białystok, ul Wiejska 45a,
Tel. +48 85 746 91 65, E-mail: i.mrozek@pb.edu.pl, v.yarmolik@pb.edu.pl

Kategorią uszkodzeń, które są jednymi z najbardziej trudnych do wykrycia w pamięci RAM, jest kategoria uszkodzeń uwarunkowanych zawartością (ang. PSF – Pattern Sensitive Faults). Uszkodzenia te wiążą zależnością grupę komórek pamięci. Jednoczesne wystąpienie odpowiednich wartości we wszystkich komórkach takiej grupy, może prowadzić do uaktywnienia tego uszkodzenia. Uaktywnienie przejawiać się będzie np. niemożnością dokonania zmiany wartości w jednej z komórek czy wymuszeniem w niej określonej wartości.

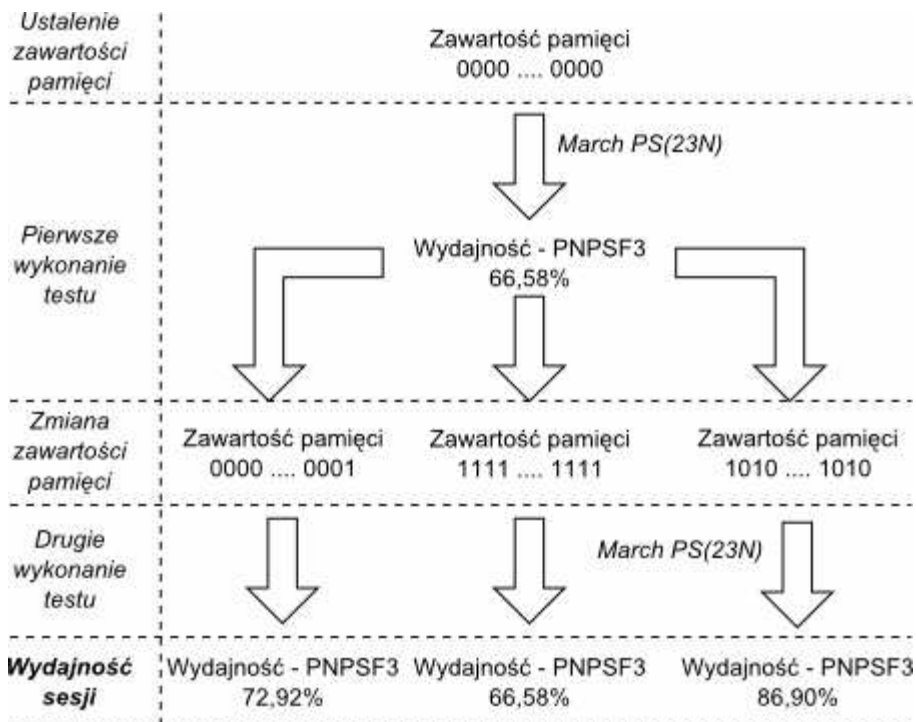
Dotychczasowe badania wykazały, iż przy obecnych rozmiarach pamięci jedynymi testami możliwymi do realnego zastosowania w procesie testowania pamięci są testy z grupy testów krokowych, określanych również mianem testów maszerujących [10] (ang. march tests). Wykazują się one bardzo wysoką wydajnością szczególnie w odniesieniu do uszkodzeń prostych (np. uszkodzenia sklejeniuowe). Problem pojawia się jednak w odniesieniu do uszkodzeń złożonych. Wtedy ich jakość (rozumiana jako liczba wykrywanych uszkodzeń danego typu w stosunku do wszystkich uszkodzeń tego typu) pozostawia wiele do życzenia. Dlatego zaproponowane zostały techniki umożliwiające zwiększenie efektywności wykrywania uszkodzeń PSF. Najważniejsze z nich to algorytm pokryciowy (ang. tiling method)[2], algorytm dwóch grup (ang. two-group method) [2], algorytm wierszowy (ang. row-March Algorithm)[4], testy transparentne (ang. transparent testing)[3,6], testowanie pseudowyczerpujące (ang. pseudo-exhaustive testing)[5], testowanie wieloprzebiegowe oparte o zmianę sekwencji adresowych [6] i testowanie wieloprzebiegowe oparte o zamianę początkowej zawartości pamięci [7]. Najbardziej obiecującą techniką z wymienionych powyżej wydaje się technika testowania wieloprzebiegowego oparta o zmianę zawartości początkowej pamięci (wektorów początkowych pamięci). Technika ta polega na wielu wielokrotnej realizacji zadanego testu przy jednoczesnej zmianie, przed każdą kolejną iteracją testu, zawartości pamięci. Jednak w zależności od przyjętej zawartości pamięci wynik końcowy może ulegać dużym wahaniom. Przykład dla przypadku dwuprzebiegowej sesji testowej testu March PS(23N) i uszkodzenia PNPSF3 przedstawia rys. 1. Po pierwszym wykonaniu testu, gdy zawartość początkowa pamięci jest ustalona na 0000...0000, wydajność całej sesji w odniesieniu do uszkodzeń PNPSF3 wynosi 66,58%. Jeżeli przed drugim iteracją testu zawartość pamięci będzie ustalona na 0000...0001, to wydajność sesji testowej będzie równa 72,92%, gdy zawartość pamięci będzie wynosiła 1111...1111 wydajność będzie wynosiła tylko 66,58%, a najwyższa wydajność 86,90% zostanie osiągnięta wtedy, gdy zawartość pamięci będzie ustalona na 1010...1010.

Z literatury znanych jest bardzo wiele testów krokowych. Ich złożoność waha się z zakresu od $4N$ do ponad $20N$ (gdzie N jest rozmiarem pamięci). Każdy z nich cechuje się określoną wydajnością. Z reguły testy o wyższej złożoności posiadają wyższą wydajność (choć nie dotyczy to wszystkich typów uszkodzeń). Jednak wyższa złożoność pociąga za sobą zwiększenie czasu wykonania testu.

2. TESTY KROKOWE

Kluczową rolę w technikach testowania pamięci odgrywają testy maszerujące, nazywane również testami krokowymi czy testami typu March [2]. Test typu March składa się ze skończonej liczby sekwencji elementów typu March. Element typu March składa się ze

skończonej liczby sekwencji operacji, z których wszystkie oddziałują na określoną komórkę przed przejściem do następnej komórki pamięci.



Rys.1. Wpływ zmiany zawartości pamięci na jakość dwuprzebiegowej sesji testowej.

Komórka następna określona jest poprzez sposób adresowania, który może być wzrastający i w którym adresy wzrastają od 0 do $N-1$ - oznaczany przez \uparrow , lub malejący w którym adresy maleją od $N-1$ do 0 - oznaczany przez \downarrow . W niektórych przypadkach sposób adresowania można wybrać dowolnie i jest to oznaczane przez \updownarrow . Możliwe operacje dostępne na komórkach pamięci dostępne w testach krokowych to: wx – zapisz do komórki pamięci wartość x i operacja rx – odczytaj wartość z komórki pamięci (wartość spodziewana = x). Cały test typu March ograniczony jest poprzez parę nawiasów klamrowych { ... }, podczas gdy element typu March ograniczony jest parą nawiasów okrągłych (...). Jako przykład rozpatrzmy test MATS+ [2]:

$$\{ \updownarrow(w0); \uparrow(r0, w1); \downarrow(r1, w0) \}$$

$M0 \quad M1 \quad M2$

Test ten składa się z trzech elementów typu March: $M0$, $M1$, $M2$. Element $M0$ zeruje pamięć. Element $M1$, w porządku adresów rosnących, odpowiednio czyta wartość 0 z komórki, następnie zapisuje tam wartość 1. Element $M2$ testu MATS+, w porządku

adresów malejących odczytuje wartość 1 z komórki, po czym do tej samej komórki wpisuje wartość 0.

Możliwość wystąpienia uszkodzenia w trakcie eksploatacji układu pamięci wymaga cyklicznego sprawdzania jakości jej działania bez niszczenia przechowywanej w niej zawartości. Można to osiągnąć używając transparentnej metody testowania. Podwaliny tej metody dał B. Koeneman. Technika ta oparta jest na liniowej analizie sygnatury pamięci. Rezultat testu jest wynikiem porównania wartości sygnatury pamięci z momentu poprzedzającego rozpoczęcie testu pamięci z wartością sygnatury pamięci wyliczonej po zakończeniu testu (lub wyliczanej w trakcie jego trwania). Jak zostało przedstawione w [6] destrukcyjne testy typu March w prosty sposób można przekształcić w testy transparentne. Przykład transparentnej wersji testu MATS + przedstawia się następująco:

$$\{ \uparrow(ra, w\bar{a}); \downarrow(r\bar{a}, wa) \}.$$

Po każdej operacji czytania, otrzymana wartość jest przekazywana do licznika, który na jej podstawie wylicza wartość sygnatury. Po zakończeniu drugiej fazy testu, wartość sygnatury, wyliczona podczas trwania testu, porównywana jest z wartością sygnatury z momentu bezpośrednio poprzedzającego rozpoczęcie testu.

3. EFEKTYWNOŚĆ TESTÓW KROKOWYCH PRZY USZKODZENIACH PNPSF*k*

Uszkodzenia pamięci, ze względu na swą specyfikę, można podzielić na uszkodzenia proste (ang. *simple faults*) i uszkodzenia powiązane (ang. *linked faults*). Uszkodzenia proste odnoszą się do pojedynczych komórek lub łączą komórki określonymi zależnościami. Uszkodzenia powiązane wiążą zaś ze sobą uszkodzenia proste. Uszkodzenia proste można podzielić na uszkodzenia związane z dekodowaniem adresu (ang. *address decoder faults - AFs*) i uszkodzenia związane z komórkami pamięci (ang. *memory cell array faults - MCAFs*), które z kolei dzielimy na uszkodzenia związane z pojedynczą komórką i uszkodzenia związane z wieloma komórkami pamięci. Uszkodzenia związane z pojedynczą komórką to np. uszkodzenie sklejeniowe (ang. *stuck-at fault*). Obecnie istniejące algorytmy jakkolwiek pozwalają w sposób efektywny wykrywać wszystkie uszkodzenia proste, to jednak wciąż trwają prace nad zwiększeniem efektywności wykrywania uszkodzeń złożonych, w szczególności uszkodzeń uwarunkowanych zawartością (ang. *Pattern Sensitive Faults - PSF*). Uszkodzenie PSF wiąże zależnością wiele komórek pamięci. Polega on na tym, iż wartość (lub możliwość zmiany wartości) określonej komórki pamięci (określanej mianem komórki bazowej) zależna jest od wartości innych komórek pamięci (komórek wiążących). Uszkodzenie to dzielone jest na następujące podtypy:

- *Active Neighborhood Pattern Sensitive Fault (ANPSF)*. Wartość komórki bazowej zmienia się w zależności od wartości i ich zmian w komórkach wiążących.
- *Passive Neighborhood Pattern Sensitive Fault (PNPSF)*. Przy określonej wartości komórek wiążących niemożliwa jest zmiana wartości komórki bazowej.
- *Static Neighborhood Pattern Sensitive Fault (SNPSF)*. Określone wartości komórek wiążących wymuszają określoną wartość komórki bazowej.

Jak zostało stwierdzone w [2] najbardziej trudnym i złożonym uszkodzeniem w procesie wykrywania jest uszkodzenie PNPSF. Dlatego w dalszej części artykułu rozpatrywany

będzie ogólny model powyższego uszkodzenia zaproponowany wiążący zależnością k komórek pamięci.

Jak zostało stwierdzone w wielu publikacjach [2, 3, 6, 8, 10] wykrycie wszystkich uszkodzeń NPSF k uzależnione jest od możliwości wygenerowania przez test wszystkich 2^{k-1} możliwych wzorców w komórkach powiązanych. Testy krokowe pozwalają tylko na wygenerowanie nielicznej grupy takich wzorców. W celu przeprowadzenia analizy efektywności testów krokowych w odniesieniu do uszkodzeń PNPSF k założmy, iż w uszkodzeniu tym komórki wiążące mają adresy wzrastające $\gamma(0) < \gamma(1) < \gamma(2) < \dots < \gamma(k-1)$, zaś komórka bazowa ma adres $\gamma(i)$, gdzie $0 \leq i \leq k-1$. Analizując standardowy test MATS+, można zauważyć, iż tylko jeden typ ze wszystkich możliwych $2k2^{k-1}$ uszkodzeń PNPSF k będzie przez ten test wykryty. Typ ten można opisać poprzez:

$$1_{\gamma(0)}1_{\gamma(1)}1_{\gamma(2)}, \dots, 1_{\gamma(i-1)}, \uparrow_{\gamma(i)}0_{\gamma(i+1)}, \dots, 0_{\gamma(k-2)}, 0_{\gamma(k-1)}. \quad (1)$$

Łatwo jest więc wyliczyć, iż efektywność testu MATS+ w odniesieniu do uszkodzenia PNPSF k jest określona poprzez (2).

$$FC_{MATS+} = \frac{1}{2^k} 100\%. \quad (2)$$

Przeprowadzając tę samą analizę dla testu March C- można stwierdzić, iż efektywność tego testu w odniesieniu do uszkodzeń PNPSF k można opisać równaniem (3).

$$FC_{March C-} = \frac{1}{2^{k-2}} 100\%. \quad (3)$$

Biorąc pod uwagę fakt, iż komórka bazowa może zmieniać swoją wartość na dwa sposoby można zauważyć, iż istnieje jedynie osiem różnych wzorców możliwych do wygenerowania przez test krokowy w komórkach wiążących. Wzorce te przedstawiają się w sposób następujący:

$$\begin{aligned} &1_{\gamma(0)}1_{\gamma(1)}1_{\gamma(2)}, \dots, 1_{\gamma(i-1)}, \uparrow_{\gamma(i)}0_{\gamma(i+1)}, \dots, 0_{\gamma(k-2)}, 0_{\gamma(k-1)}, \\ &0_{\gamma(0)}0_{\gamma(1)}0_{\gamma(2)}, \dots, 0_{\gamma(i-1)}, \downarrow_{\gamma(i)}1_{\gamma(i+1)}, \dots, 1_{\gamma(k-2)}, 1_{\gamma(k-1)}, \\ &0_{\gamma(0)}0_{\gamma(1)}0_{\gamma(2)}, \dots, 0_{\gamma(i-1)}, \uparrow_{\gamma(i)}1_{\gamma(i+1)}, \dots, 1_{\gamma(k-2)}, 1_{\gamma(k-1)}, \\ &1_{\gamma(0)}1_{\gamma(1)}1_{\gamma(2)}, \dots, 1_{\gamma(i-1)}, \downarrow_{\gamma(i)}0_{\gamma(i+1)}, \dots, 0_{\gamma(k-2)}, 0_{\gamma(k-1)}, \\ &0_{\gamma(0)}0_{\gamma(1)}0_{\gamma(2)}, \dots, 0_{\gamma(i-1)}, \uparrow_{\gamma(i)}0_{\gamma(i+1)}, \dots, 0_{\gamma(k-2)}, 0_{\gamma(k-1)}, \\ &0_{\gamma(0)}0_{\gamma(1)}0_{\gamma(2)}, \dots, 0_{\gamma(i-1)}, \downarrow_{\gamma(i)}0_{\gamma(i+1)}, \dots, 0_{\gamma(k-2)}, 0_{\gamma(k-1)}, \\ &1_{\gamma(0)}1_{\gamma(1)}1_{\gamma(2)}, \dots, 1_{\gamma(i-1)}, \uparrow_{\gamma(i)}1_{\gamma(i+1)}, \dots, 1_{\gamma(k-2)}, 1_{\gamma(k-1)}, \\ &1_{\gamma(0)}1_{\gamma(1)}1_{\gamma(2)}, \dots, 1_{\gamma(i-1)}, \downarrow_{\gamma(i)}1_{\gamma(i+1)}, \dots, 1_{\gamma(k-2)}, 1_{\gamma(k-1)}. \end{aligned}$$

Wszystkie możliwe do wykrycia przez test krokowy uszkodzenia PNPSF5 przedstawia tabela 2.

Tab. 2. Typy uszkodzeń PNPSF5 możliwe do wykrycia przez test krokowy

L.p.	Uszkodzenia PNPSF5
#1	↑0000, 1↑000, 11↑00, 111↑0, 1111↑
#2	↓1111, 0↓111, 00↓11, 000↓1, 0000↓
#3	0000↑, 000↑1, 00↑11, 0↑111, ↑1111
#4	1111↓, 111↓0, 11↓00, 1↓000, ↓0000
#5	↑0000, 0↑000, 00↑00, 000↑0, 0000↑
#6	↓0000, 0↓000, 00↓00, 000↓0, 0000↓
#7	↑1111, 1↑111, 11↑11, 111↑1, 1111↑
#8	↓1111, 1↓111, 11↓11, 111↓1, 1111↓

Biorąc zatem pod uwagę powyższe spostrzeżenia można wyliczyć maksymalną efektywność (rozumianą jako procent możliwych do wykrycia uszkodzeń) testu krokowego w odniesieniu do uszkodzeń typu PNPSF k . Efektywność ta opisana jest poprzez (4)

$$FC_{MAX} = \frac{8k-8}{k2^k} 100\% = \frac{k-1}{k2^{k-3}} 100\%. \quad (4)$$

Podkreślenia wymaga fakt, iż żadna zmiana adresowania, oraz zawartości początkowej pamięci nie spowoduje, iż jedno wykonanie dowolnego testu krokowego umożliwi wykrycie uszkodzeń PNPSF k efektywniej, niż zostało to określone poprzez (4). Potwierdzenie powyższego faktu znajduje odzwierciedlenie w tab. 3 gdzie zamieszczone zostały wyniki eksperymentalne w odniesieniu do wybranych testów krokowych.

Tab. 3. Eksperymentalne wyniki wydajności testów krokowych

Test/Fault type	PNPSF3	PNPSF5	PNPSF9
MATS+	12,52 %	3,10 %	0,18 %
March C-	50,08 %	12,46 %	0,78 %
March PS(23N)	66,58 %	19,96 %	1,39 %

Jak jest łatwo pokazać, oraz jak wynika z rezultatów zamieszczonych w tab. 3, z analizowanych testów tylko test March PS(23N) charakteryzuje się pełną możliwą wydajnością w odniesieniu do uszkodzeń PNPSF k . Należy jednak zauważyć, iż złożoność powyższego testu jest stosunkowo duża i wynosi 23N.

4. WAŻONA WYDAJNOŚĆ TESTÓW KROKOWYCH

W punkcie 3 przeprowadzono analizę wydajności testów krokowych w odniesieniu do uszkodzeń PNPSF k . Wydajność niektórych z nich przedstawiono w tab. 3. Jednak tak zdefiniowana wydajność nie określa kosztów, które należy ponieść aby taki rezultat osiągnąć. Jednym z podstawowych kosztów jest złożoność testu, która w sposób bezpośredni odzwierciedla czas realizacji testu jak również w pewnym stopniu koszt jego implementacji. Zatem bardziej obiektywnym współczynnikiem określającym wydajność testu będzie ważony współczynnik w którym określa się wydajność przypadającą na jedną instrukcję testu. Można go zdefiniować następującym wzorem:

$$WFC_{TEST}(PNPSFk) = \frac{FC_{TEST}}{C_{TEST}} \quad (5)$$

gdzie:

FC_{TEST} – standardowa wydajność testu

C_{TEST} – złożoność testu

Współczynnik ten pozwala obiektywniej ocenić wydajność testu krokowego, ponieważ uwzględnia również czas realizacji testu, jak również koszt jego implementacji sprzętowej. Wyliczone wartości ważonego współczynnika wydajności dla wybranych testów krokowych i uszkodzeń PNPSF3 i PNPSF5 przedstawia tab. 4.

Tab. 4. Wazony współczynnik wydajności dla wybranych testów krokowych

Test	C	PNPSF3		PNPSF5	
		FC	WFC	FC	WFC
PS(3N)	3N	12,5%	4,160	3,125%	1,041
MATS+	5N	12,5%	3,125	3,125%	0,781
MPS(3N)	5N	25,0%	5,000	6,250%	1,250
MATS++	5N	25,0%	5,000	6,250%	1,250
March X	5N	25,0%	5,000	6,250%	1,250
March Y	7N	25,0%	3,570	6,250%	0,893
March A	14N	33,0%	2,350	8,750%	0,589
March B	16N	33,0%	2,060	8,750%	0,516
Algorithm B	16N	50,0%	3,125	13,750%	0,859
March C-	9N	50,0%	5,550	12,50%	1,388
March LA	21N	50,0%	2,380	12,50%	0,595
March PS(22N)	22N	66,6%	3,030	20,00%	0,9090
March PS(18N)	17N	66,6%	3,920	20,00%	1,1765

Z uzyskanych danych wynika, że zarówno testy złożone, jak również testy proste mogą mieć zbliżoną wartość współczynnika ważonego, np. dla testu March PS(22N) i uszkodzenia PNPSF3 wartość ta jest równa 3,03, zaś dla testu MATS+ i tego samego uszkodzenia wynosi 3,125. W niektórych przypadkach w świetle zdefiniowanego współczynnika testy proste są bardziej efektywne od testów złożonych, np. wartość współczynnika dla testu PS(3N) i uszkodzenia PNPSF3 jest równa 4,160, a dla testu March LA i tego samego uszkodzenia wynosi tylko 2,38.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, iż w przypadku, gdy nie jest znana informacja o fizycznym rozmieszczeniu komórek pamięci w testowanym układzie, a przede wszystkim o ich wzajemnym sąsiedztwie, zwiększenie wydajności testów krokowych, w odniesieniu do uszkodzeń uwarunkowanych zawartością, nie może być osiągnięte poprzez zwiększenie złożoności testu krokowego. Wynika to również z rozważań przeprowadzonych w punkcie 3 i maksymalnej wydajności testów krokowych w odniesieniu do uszkodzeń PNPSFk opisaną przez wzór (4). Wydaje się, iż jedynym rozwiązaniem pozwalającym efektywnie wykrywać uszkodzenia uwarunkowane zawartością, jest rozwiązanie oparte o wieloprzebiegowe sesje testowe. Każda iteracja sesji testowej wykonuje się w oparciu o inne warunki początkowe (inna zawartość pamięci, inny

sposób adresowania lub jedno i drugie). Jak wynika z przedstawionych rezultatów w tab. 4 stosowanie testów o małej złożoności w testowaniu wieloprzebiegowym może być tak samo efektywne jak stosowanie testów o dużej złożoności. Podkreślić należy, iż stosując jako testy bazowe krótkie testy krokowe w technice testowania wieloprzebiegowego, uzyskujemy większą częstotliwość występowania poprawnych punktów przerwania testu, niż w przypadku testów o wyższej złożoności. Przez poprawny punkt przerwania testowania rozumiany jest tutaj moment w którym przerwanie procesu transparentnego testowania pamięci RAM pozostawia zawartość pamięci niezmienną w stosunku do wartości z momentu bezpośrednio poprzedzającego rozpoczęcie testów (przyjmując założenie o poprawności działania pamięci). Wynika to z faktu, iż wieloprzebiegową sesję testową można bezpiecznie przerwać po zakończeniu każdej iteracji testu. Oczywiście jest, iż w czasie trwania transparentnego testu pamięci całe urządzenie elektroniczne (lub jego moduł) jest „zamrożone”. Duża częstotliwość występowania poprawnych punktów przerwania testu umożliwia przerwanie testu na żądanie, gdy niezbędne jest podjęcie natychmiastowego działania przez testowane urządzenie.

5. WYNIKI EKSPERYMENTALNE

W rozdziale tym przedstawione zostaną wyniki przeprowadzonych testów otrzymane drogą symulacji. Porównana została wydajność sesji testowych opartych o krótkie testy krokowe z testami krokowymi o wysokiej złożoności. Wyniki przeprowadzonych badań zawarte są w tab. 5. W tabeli tej oznaczenie „4r” przed nazwą testu oznacza sesje testową w której zadany test wykonywany jest czterokrotnie.

Tab.5. Wydajność sesji testowych opartych o krótkie testy krokowe

Test	C	PNPSF3		PNPSF5	
		FC	WFC	FC	WFC
4rMATS+	16	48.16%	3.01	12.49%	0.7806
4rPS(3N)	12	48.16%	4.01	12.49%	1.0408
4rMPS(3N)	20	85.29%	4.26	24.82%	1.2410

Analiza otrzymanych wyników przeprowadzona zostanie na bazie porównania sesji testowej „4rMPS(3N)” z testem MARCH LA. Złożoność całkowita sesji testowej jest równa 20N, zaś rozpatrywanego testu – 21N. Otrzymana wydajność w odniesieniu do uszkodzeń PNPSF3 jest równa odpowiednio 85,29% i 50% (porównaj tab. 4 i tab. 5). Widać zatem, iż sesja testowa oparta o krótkie testy krokowe okazała się wydajniejsza niż złożony test MARCH LA. Identycznie przedstawia się porównanie wydajności powyższych testów w odniesieniu do uszkodzeń bardziej złożonych – PNPSF5. W niektórych wypadkach można zaobserwować sytuację odwrotną – złożony test krokowy cechuje się wyższą wydajnością w porównaniu z sesją testową. Jednak z licznych badań i symulacji przeprowadzonych przez autorów wynika, iż wydajność sesji testowych opartych o krótkie testy jest z reguły wyższa bądź bardzo zbliżona do wydajności testowania opartego o testy złożone.

6. WNIOSKI

W artykule uwaga skupiona była na wieloprzebiegowym testowaniu pamięci RAM. Podejście takie jest jednym, które umożliwia efektywne wykrywanie uszkodzeń złożonych pamięci RAM. Został zaproponowany ważony współczynnik wydajności testów krokowych. Współczynnik ten bardziej obiektywnie określa wydajność danego testu w stosunku do standardowej wydajności uwzględniającej jedynie procentową wartość wykrywanych uszkodzeń. W punkcie 4 wyznaczone zostały wartości tego współczynnika dla najważniejszych, znanych z literatury, testów krokowych, zaś w punkcie 5 przedstawiono wyniki wydajności sesji testowych złożonych z krótkich testów krokowych. Z otrzymanych rezultatów wynika, iż w przypadku testowania wieloprzebiegowego, celowe wydaje się używanie większej liczby iteracji testów o małej złożoności, niż zmniejszenie liczby iteracji poprzez użycie testów o wysokiej złożoności. Zaletą testowania wieloprzebiegowego opartego o testy o niskiej złożoności jest prostsza implementacja sprzętowa testu jak również zwiększona liczba występowania punktów poprawnego przerwania testu.

Oczywiste jest, iż powyższe rozważania o wykorzystaniu testów o niskiej złożoności w testowaniu wieloprzebiegowym zakładają optymalną zmianę wektorów pamięci pomiędzy poszczególnymi wykonaniami testu. Opis problem optymalnego doboru wektorów testowych pamięci w testowaniu wieloprzebiegowym można odnaleźć np. w [8] i [9].

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] E. J. Marinissen, B. Prince, D. Keitel-Schulz, and Y. Zorian. Challenges in embedded memory design and test. In DATE '05: Proceedings of the conference on Design, Automation and Test in Europe, pages 722–727, 2005.
- [2] A. J. van de Goor. Testing Semiconductor Memories: Theory and Practice. John Wiley & Sons, Chichester, England, 1991.
- [3] B. F. Cockburn. Deterministic tests for detecting scrambled pattern-sensitive faults in RAMs. In MTDT '95: Proceedings of the IEEE International Workshop on Memory Technology, Design and Testing, pages 117–122, Washington, DC, USA, 1995. IEEE Computer Society.
- [4] M. Franklin and K. K. Saluja. Testing reconfigured RAM's and scrambled address RAM's for pattern sensitive faults. IEEE Transactions on CAD of Integrated Circuits and Systems, 15(9):1081–1087, 1996.
- [5] M. G. Karpovsky, A. J. van de Goor, and V. N. Yarmolik. Pseudo-exhaustive word-oriented DRAM testing. In EDTC '95: Proceedings of the 1995 European conference on Design and Test, page 126, Washington, DC, USA, 1995. IEEE Computer Society.
- [6] Nicolaidis M. «Transparent BIST for RAMs», Proc. IEEE Int. Test Conf., Baltimore, MD, Oct. 1992, pp. 598-607
- [7] B. Sokol and S. V. Yarmolik. Address sequences for march tests to detect pattern sensitive faults. In DELTA '06: Proceedings of the Third IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications, pages 354–360, Kuala Lumpur, Malaysia, January 17-19 2006. IEEE Computer Society.
- [8] S. V. Yarmolik and I. Mrozek. Multi background memory testing. In MIXDES 07: Proceedings of the 14th International Conference Mixed design of integrated circuits

- and systems, pages 511–516, Ciechocinek, Poland, June 21-23 2007. IEEE Computer Society.
- [9] I. Mrozek, V. Yarmolik, Optimal backgrounds selection for multi run memory test-ing, Design and diagnostics of electronic circuits and systems : 11th International Workshop IEEE : DDECS 2008, Bratislava (Słowacja), 2008, pp. 332-338
- [10] Sosnowski, J. (2005). Testowanie i niezawodność systemów komputerowych, Akademicka oficyna wydawnicza EXIT.