

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Warszawa, 29 maja 2018 r.

D z i e k a n a t

Uprzejmie informuję, że na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej odbędzie się w dniu 12 czerwca 2018 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

mgr inż. Marka Ciepluchy

temat:” Metodyka weryfikacji funkcjonalnej cyfrowych układów scalonych z wykorzystaniem testów regresyjnych”.

promotor – dr hab. inż. Witold Pleskacz, prof. Politechniki Warszawskiej

recenzenci:

prof. dr hab. inż. Edward Hryniewicz z Politechniki Śląskiej

dr hab. inż. Robert Szczygiel z Akademii Górniczo-Hutniczej

Obrona odbędzie się w dniu 12 czerwca 2018 r. w Audytorium Centralnym na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych – Gmach im. Janusza Groszkowskiego, Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19; początek godz. 10³⁰.

Po adresem: www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje zapewniony jest na stronie Wydziału dostęp do tekstów streszczenia rozprawy i recenzji, jak również do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Dziekan



prof. dr hab. inż. Krzysztof Zaremba

Rozprawa doktorska

mgr inż. Marek Cieplucha

Metodyka weryfikacji funkcjonalnej cyfrowych układów scalonych z wykorzystaniem testów regresyjnych

Promotor: prof. nzw. dr hab. inż. Witold Pleskacz

Streszczenie

Niniejsza rozprawa porusza zagadnienia weryfikacji funkcjonalnej cyfrowych układów scalonych. Przedstawiona jest nowa metodyka, w której zaproponowano usprawnienia współcześnie wykorzystywanych technik weryfikacji. W szczególności, opisano nowe podejście do procedury testowania regresyjnego, które pozwala na poprawę efektywności testowania (rozumianej jako wydajność symulacji komputerowej). W rozprawie zaprezentowano model matematyczny testowania regresyjnego oraz implementację kompletnego środowiska weryfikacyjnego wykorzystującego przedstawione mechanizmy.

118 stron

19 rysunków

78 pozycji bibliografii

Słowa kluczowe: weryfikacja funkcjonalna, metodyki weryfikacji, weryfikacja losowa z ograniczeniami, weryfikacja z wykorzystaniem metryk, testowanie regresyjne, projektowanie cyfrowych układów scalonych, automatyzacja projektowania komputerowego

Kraków, 19-04-2018

dr hab. inż. Robert Szczygieł
Akademia Górniczo-Hutnicza im St. Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Metrologii i Elektroniki
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

wykonana na podstawie uchwały Rady Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechniki Warszawskiej z dn. 27 lutego 2018 roku.

Autor rozprawy: **mgr inż. Marek Cieplucha**

Tytuł rozprawy: **Metodyka weryfikacji funkcjonalnej cyfrowych układów scalonych z
wykorzystaniem testów regresyjnych.**

1. *Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Autor w swojej pracy dyplomowej rozważa zagadnienie ogólnie rozumianych kosztów weryfikacji funkcjonalnej cyfrowych układów scalonych prowadzonych przy użyciu testów regresyjnych. Autor jasno definiuje tezę pracy twierdząc, że efektywność weryfikacji może być zwiększona poprzez zastosowanie segmentów testów oraz punktów zatrzymania. Rozprawa ma charakter praktyczno-teoretyczny, przedstawia konkretne rozwiązanie postawionego problemu oraz jego analizę teoretyczną.

2. *Czy w rozprawie przeprowadzono właściwie analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczący o dostatecznej wiedzy Autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?*

Bibliografia rozprawy zawiera 78 referencji, które w mojej ocenie są bardzo dobrze dobrane. Przedstawiają one wyraźnie istniejące tendencje w rozwoju metodyki weryfikacji funkcjonalnej układów cyfrowych. Cytowania pozycji bibliograficznych są właściwie umieszczone w tekście rozprawy i dobrze dokumentują wiedzę autora we wspomnianym temacie. Przeprowadzony opis aktualnego stanu wiedzy dobrze uzasadnia celowość podjętych przez autora prac.

3. *Czy Autor rozwiązał przedstawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?*

* Pytania mają charakter pomocniczy, nie stanowią treści recenzji.



Twierdzenie postawione w umieszczonej na początku rozprawy tezie zostało w mojej opinii poprawnie uzasadnione. Autor na podstawie analizy aktualnego stanu wiedzy poprawnie określił cele badań. Następnie zaproponował nowe rozwiązanie, które uzasadnił teoretycznie, i zastosował w konkretnym przykładzie. Metodyka pojętych prac była prawidłowa.

4. *Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?*

Oryginalny dorobek Autora rozprawy stanowi:

- opracowanie nowej metodyki projektowania testów regresyjnych opartej na zasadzie hierarchicznego wykorzystania punktów zatrzymania do optymalizacji czasu symulacji,
- opracowanie koncepcji środowiska symulacyjnego dla testów regresyjnych; środowisko to jest niezależne od symulatora i udostępnia znacznie szerszą funkcjonalność od dostępnych obecnie rozwiązań komercyjnych, m. in. umożliwia zastosowanie wymienionej nowej metodyki.

Koncepcja środowiska symulacyjnego została zaimplementowana w języku Python, z wykorzystaniem współczesnych metod projektowania obiektowego. Nowa metodyka testowania regresyjnego została sprawdzona na przykładzie otwartego IP Core kontrolera APB2C.

5. *Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?*

Praca jest napisana poprawnym językiem polskim, przeczytałem ją z przyjemnością. Autor prowadzi wywody w sposób logiczny i przedstawia swoje poglądy generalnie w sposób przekonujący. Jedynym (choć standardowym w tej tematyce) problemem jest tłumaczenie wyrażeń specjalistycznych z języka angielskiego na polski. Osobiście uważam, że tego typu prace powinny być pisane w języku angielskim, z uwagi na potencjalne grono odbiorców.

6. *Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?*

Pomimo pozytywnej oceny całości rozprawy chciałbym zwrócić uwagi na pewne jej niedociągnięcia.

Pierwsza uwaga dotyczy przedstawionego w rozdziale 4.2 modelu probabilistycznego oraz przeprowadzonych dalej symulacji monte-carlo. Na s. 76 przy opisywaniu warunków generowania zmiennych losowych prawdopodobieństw pokrycia i kosztów, Autor stwierdza, że: „Dla głębokości drzewa $q > 1$, wygodnie było założyć, że wybrana ścieżka drzewa rozpoczynająca się od punktu C_0 , tzn. sekwencja q segmentów wykonanych kolejno po sobie, zapewni zbliżony poziom pokrycia metryk jak pojedynczy test przy podobnym koszcie”. Założenie takie wprowadza korelację pomiędzy wymienionymi zmiennymi, której wpływ na końcowe wyniki trudno ocenić. Zdecydowanie brakuje w tym miejscu wykresów przedstawiających zależności pomiędzy zmiennymi dla wygenerowanych w symulacji danych oraz otrzymanych rozkładów prawdopodobieństwa. W szczególności interesująca byłaby zależność pomiędzy $P(M_b, T_i)$ i $K(T_i)$ oraz $P(M_b, S_b, C_k)$ i $K(S_i)$ dla różnych głębokości drzewa q .

Druga uwaga dotycząca tego samego rozdziału odnosi się do jednoczesnego wprowadzenia kilku zmiennych losowych do symulacji i braku analizy wpływu poszczególnych zmiennych. Podejście takie

bardzo utrudnia zrozumienie całości problemu. Stąd też w podsumowaniu rozdziału Autor zatrzymuje się na poziomie obserwacji wyników symulacji i nie wyciąga wniosków dotyczących wpływu poszczególnych parametrów na wyniki końcowe. W szczególności przydatne byłyby wyniki symulacji przeprowadzone przy ustalonych wartościach prawdopodobieństwa pokrycia albo kosztów.

Koniec końców, przedstawione symulacje modelu probabilistycznego pokazują przewagę opracowanej metody, ale nie wyjaśniają, skąd ta przewaga pochodzi.

Kolejna uwaga dotyczy rozdziału 4.3 przedstawiającego implementację środowiska testów regresyjnych. W przypadku symulacji mamy już dostępne konkretne czasy wykonania poszczególnych testów. Jakie one są? W jaki sposób powstała różnica przedstawiona na rys. 4.10 – czy pochodzi ona wyłącznie od zmniejszenia liczby testów, czy istnieje inny czynnik?

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Podsumowując, pomimo przedstawionych zastrzeżeń uważam, że praca przedstawia interesujące rozwiązanie, którego duży potencjał kryje się w możliwości dołączania algorytmów selekcji punktów zatrzymania i segmentów testowych na podstawie danych z historii symulacji. Tematyka ta jednakże wychodzi poza obszar opisywany w rozprawie.

8. Do której z następujących kategorii recenzent zalicza rozprawę:

- a) nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,*
- b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,*
- c) spełniająca wymagania,*
- d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem,*
- e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.*

Zgodnie z zaleceniami Rady Wydziału EiT Politechniki Warszawskiej oceniam pracę w podanej skali jako „d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem”.



**KWESTIONARIUSZ-RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY
WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy: „Metodyka weryfikacji funkcjonalnej cyfrowych układów scalonych z wykorzystaniem testów regresyjnych”

Autor: mgr inż. Marek Cieplucha

Promotor: dr hab. inż. Witold Pleskacz, prof. PW

- 1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

W rozprawie Autor zajął się weryfikacją modeli/projektów cyfrowych układów scalonych opisanych w języku opisu sprzętu. Weryfikacja projektów cyfrowych układów scalonych nie jest zagadnieniem nowym. Na rynku są dostępne narzędzia wspomagające ten proces np. firm. Cadence, Aldec i innych. Wykonywana jest weryfikacja formalna, weryfikacja funkcjonalna, weryfikacja layout'u i inne. Autor skupił swoje rozważania na usprawnieniu weryfikacji funkcjonalnej wykonywanej z wykorzystaniem testów regresyjnych

Praca w swej zasadniczej części ma charakter teoretyczny (rozdz. 3 i część rozdz. 4.). W rozdziale czwartym rozważania teoretyczne uzupełnia bogaty materiał eksperymentalny pokazujący wzrost efektywności weryfikacji przy zastosowaniu metodyki zaproponowanej przez Autora.

- 2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

Wykaz literatury wykorzystanej do napisania rozprawy składa się z 78 pozycji dotyczących weryfikacji z ostatnich dwudziestu lat. Przeważająca część tych publikacji dotyczy weryfikacji modeli/projektów układów scalonych a kilka testowania regresyjnego programów komputerowych. Te ostatnie Autor zamieścił – jak sędzę – z powodu tego, że testowanie regresyjne modeli układów scalonych wywodzi się z testów regresyjnych programów komputerowych. Autor dokonał szczegółowego przeglądu z literatury (blisko połowa tekstu w rozprawie) wskazując niedogodności stosowanych narzędzi weryfikacji, standardów i metodyk. Na tej podstawie mógł proponować usprawnienia służące do projektowania środowiska weryfikacji i podniesienia jej efektywności.

- 3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?**

Autor zajął się usprawnieniem weryfikacji funkcjonalnej cyfrowych układów scalonych od strony programistycznej co w praktyce oznacza weryfikację modeli układów scalonych

opisanych w języku opisu sprzętu (*HDL*). Dążąc do rozwiązania zagadnienia zaproponował własną metodykę postępowania przy tworzeniu środowiska do weryfikacji funkcjonalnej modeli cyfrowych układów scalonych opartą na mechanizmach testowania losowego z ograniczeniami i wykorzystaniu interfejsu *API*. Zmienne losowe (np. miejsca zatrzymania i miejsca startu kolejnego segmentu testowego) i ograniczenia (np. zakres losowania wartości zmiennej) definiowane są niezależnie jak w języku *SystemVerilog* ale ograniczenia są dowolnymi funkcjami. Dla wykorzystania interfejsu *API* Autor przygotował szereg funkcji (zgodnych z semantyką *SystemVerilog*) przydatnych przy tworzeniu aplikacji.

Zarządzanie procesem weryfikacji oparte jest na punktach zatrzymania testu i segmentach testowych, których wywoływanie tworzy strukturę drzewa, a przebieg procesu wywoływania ustala projektant środowiska weryfikacyjnego. Jednak losowy wybór wartości zmiennych i wpływ metryk pokrycia funkcjonalnego na przebieg procesu powoduje, że ta struktura ulega dynamicznym zmianom. Szczególnie ta dynamiczna zmienność przebiegu weryfikacji stanowi pewne *novum* w rozważanym procesie. Autor skutecznie pokonał problemy zauważone w trakcie analizy literatury i pojawiające się przy pracy z istniejącymi narzędziami weryfikacji i testowania.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Autor opracował własną architekturę pokrycia funkcjonalnego, która ma strukturę drzewa prefiksowego, jest hierarchiczna i zapewnia większą funkcjonalność i elastyczność niż dostępne w *SystemVerilog*. Autor uzyskał to nie korzystając z języka *SystemVerilog* a z języka *Python*, który zapewnił większą swobodę i prostotę implementacji zaproponowanych mechanizmów. Wykorzystanie idei weryfikacji losowej z ograniczeniami i segmentów testowych przyniosło Autorowi wyraźne zwiększenie efektywności weryfikacji z wykorzystaniem testowania regresyjnego. Zdaniem recenzenta ten efekt jest najistotniejszym praktycznym rezultatem rozprawy.

Ponadto na podkreślenie zasługują rozważania dotyczące efektywności zaproponowanej metodyki weryfikacji cyfrowych układów scalonych przedstawione w pierwszej części rozdziału czwartego a wnoszące do rozprawy pewne formalizmy matematyczne. Ponadto osiągnięciem Autora jest projekt środowiska weryfikacji przygotowany z wykorzystaniem platformy *COCOTB* i opracowanych usprawnień dedykowany dla kontrolera magistrali I^2C o symbolu *APB12C* zaczerpniętego z biblioteki *OpenCores*. Uzyskane wyniki eksperymentów potwierdzają wyraźny wzrost efektywności weryfikacji w oparciu o strukturę drzewa wywołań segmentów testowych w porównaniu ze strukturą szeregową.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Rozprawa napisana jest zasadniczo poprawnie. Jest ilustrowana szeregiem rysunków, wydruków i wykresów ułatwiających czytelnikowi percepcję jej treści. Również część eksperymentalna wpływa na pozytywny odbiór pracy. Pewną niedogodnością przy czytaniu jest to, że niemal każdy rozdział zaczyna się od analizy literatury co utrudnia śledzenie głównego rozwiązania/głównych rozwiązań. Zdaniem recenzenta lepsze jest poprzedzenie głównych rozważań analizą literatury i wyspecyfikowanie problemów, które wymagają rozwiązania a następnie już nie przerywanie głównego toku myśli.

Liczba błędów redakcyjnych jest bardzo mała. Recenzentowi udało się znaleźć brak legendy do wykresów z rys 4.3. oraz brak odsyłacza w podpisie pod rys. 2.1. (odsyłacz jest

wprawdzie w tekście ale dobrą praktyką jest umieszczanie go w podpisie pod rysunkiem). Autor też zapomina o zasadzie że „za pomocą czegoś” np. „za pomocą asercji - str. 33” - a „przy pomocy kogoś”.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Jeśli idzie o uwagi szczegółowe to zostały wymienione w punkcie 5 i są mało znaczące. W ramach uwag polemicznych to oprócz tej, którą już wymieniałem powyżej nasuwają się jeszcze następujące:

Szkoda, że autor jasno nie precyzuje różnic pomiędzy testowaniem a testowaniem regresyjnym. Jak wspomniano wcześniej nazwa testowanie regresyjne wywodzi się z testowania programów po usunięciu błędu/błędów. Jednak często polega to na uruchamianiu tych samych testów, które posłużyły do wykrycia usuniętego błędu. Podobna sytuacja jest przy weryfikacji modeli cyfrowych układów scalonych czy po prostu komponentów wirtualnych (VC) jak np. weryfikowany w rozprawie. Czym zatem różni się testowanie regresyjne od testowania po prostu (nawet jeżeli testy po usunięciu błędów trzeba zmodyfikować)?

Sądzę, że wyjaśnienia wymaga też to do jakiego etapu procesu projektowego układu scalonego przewiduje autor zastosowanie opracowanej metodyki weryfikacji - przed syntezą czy po syntezie. Wydaje mi się, że przed syntezą sprawa jest oczywista natomiast po syntezie trzeba by jeszcze dołączyć wpływ wnoszony np. przez layout.

Zaproponowany przez Autora podział procesu weryfikacji na segmenty testowe jest podobny do idei testowania układu zwanej *reseeding*, którą można znaleźć np. w następujących publikacjach:

S. Hellebrand, J. Rajski, S. Tarnick, S. Venkataraman, B. Courtois: "Built-in test for circuits with scan based on reseeding of multiple-polynomial linear feedback shift registers", IEEE Transactions on Computers (Volume: 44, Issue: 2, Feb 1995), pp. 223-233.

Mahmut Yilmaz, Krishnendu Chakrabarty: "Seed selection in LFSR-reseeding-based test compression for the detection of small-delay defects", Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, 2009. DATE '09, 20-24 April 2009, Nice, France, pp. 1488-1493

a także w pracach z mojego ośrodka jak np:

Novak O., Pliva Z., Nosek J., Hławiczka A., Garbolino T., Gucwa K.: Test-per-clock logic BIST with semi-deterministic test patterns and zero-aliasing compactor. JOURNAL OF ELECTRONIC TESTING: Theory and Applications, No. 20, 2004, pp. 109-122

T. Garbolino, A. Hławiczka: "Ustawianie stanu początkowego liniowych generatorów testów zbudowanych w oparciu o przerzutniki T", Materiały Krajowego Sympozjum Telekomunikacji KST'2000, Bydgoszcz, 6-8 września 2000, str. 95-101.

Wprawdzie prace te dotyczą specyficznych generatorów testów opartych na rejestrach liniowych (LFSR) ale są blisko poruszanego w rozprawie zagadnienia i szkoda, że żadna nie była przez autora analizowana.

W nawiązaniu do powyższego wyjaśnienia wymaga to czy następny segment testowy zaczyna się od punktu zatrzymania poprzedniego segmentu czy od nowego punktu startowego. Nie jest to jasno sprecyzowane.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Weryfikacja projektów cyfrowych a także analogowych układów scalonych jest ważnym zagadnieniem wpływającym na jakość tych układów i na koszty projektu. Przygotowanie procesu weryfikacji i sam proces zajmuje dużo czasu i po prostu kosztuje. Dlatego prace zmierzające do uproszczenia i skrócenia tego procesu są ważne nie tylko z naukowego ale także z praktycznego punktu widzenia. Recenzowana rozprawa mieści się w nurcie tych prac i wnosi do nich wartość dodaną.

8. Do której kategorii z następujących recenzent zalicza rozprawę?

Biorąc pod uwagę osiągnięte w rozprawie rezultaty i ich przydatność oceniam rozprawę jako

c) spełniająca wymagania.

9. Podsumowanie

Pomijając zamieszczone w p. 6. uwagi, stwierdzam, że Pan mgr inż. Marek Cieplucha opracowując przedstawiłą w rozprawie metodykę weryfikacji cyfrowych układów scalonych wykazał się umiejętnościami zarówno do prowadzenia prac badawczych jak i projektowania testów. Wyczerpuje to wymagania dla uzyskania stopnia doktora nauk technicznych stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytule naukowym stawiam zatem wniosek o dopuszczenie Go do publicznej obrony.

