

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Warszawa, 23 października 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 13 listopada 2018 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

Mgr. inż. Krzysztofa Sielewicza

temat: „Mitigation Methods Increasing Radiation Hardness of the FPGA-Based Readout of the ALICE Inner Tracking System”

promotor – dr hab. inż. Krzysztof Poźniak, prof. Politechniki Warszawskiej

recenzenci:

dr hab. inż. Piotr Maj, prof. Akademii Górniczo – Hutniczej Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej

dr hab. Marcin Konecki Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Obrona odbędzie się w dniu 13 listopada 2018 r. w sali 116 na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych – Gmach im. Janusza Groszkowskiego, Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19; początek godz. 11³⁰.

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

Autor pracy - mgr inż. Krzysztof Sielewicz

Promotor - dr hab. inż. Krzysztof Poźniak, prof. Politechniki Warszawskiej

Tytuł rozprawy: "Metody zwiększania odporności radiacyjnej dla wewnętrznego systemu śladowego opartego na układach FPGA w eksperymencie ALICE"

Streszczenie

W latach 2019-2020 eksperyment ALICE w CERN przejdzie gruntowną modernizację, podczas której zostanie zainstalowany nowy wewnętrzny system śladowy (Inner Tracking System - ITS). Będzie się on składał z 24,120 sensorów wykonanych w technologii Monolithic Active Pixel Sensor (MAPS). Ze względu na fakt, że sensory pikselowe zostały zaprojektowane z uwzględnieniem jak najniższego poboru energii elektrycznej, nie są w stanie transmitować danych na dużą odległość. W związku z tym system odczytu danych do detektora ITS musi zostać zlokalizowany możliwie blisko niego - w środowisku gdzie występuje promieniowanie jonizujące i niejonizujące. System odczytu danych pełni wiele funkcji dotyczących sterowania, kontroli i odczytywania danych z detektora, wstępnego przetwarzania oraz komunikacji z systemami zasilania, wyzwalania i akwizycji danych. Wykorzystanie reprogramowalnych układów FPGA pozwala na implementację skomplikowanych funkcjonalności oraz umożliwienie modyfikacji pracy systemu wraz z czasem użytkowania. Odporne na wpływ promieniowania układy FPGA nie mogą zostać wykorzystane ze względu na niewystarczającą ilość zasobów logicznych lub zbyt wysoki koszt. Natomiast układy FPGA oparte o pamięć konfiguracyjną typu SRAM, które oferują wystarczającą ilość zasobów logicznych i szybkich peryferii do transmisji danych, nie są odporne na promieniowanie jonizujące i niejonizujące. Istnieją jednak metody, które pozwalają na zwiększenie odporności radiacyjnej układów SRAM FPGA.

Niniejsza praca doktorska dotyczy metod zwiększania odporności radiacyjnej struktur logicznych implementowanych w komercyjnych układach SRAM FPGA, które nie zostały zaprojektowane do pracy w środowisku, gdzie występuje promieniowanie jonizujące i niejonizujące. Autor poddał weryfikacji tezę o tym, że system odczytu danych do detektora ITS może zostać skonstruowany w oparciu o komercyjne układy SRAM FPGA, które nie zostały przystosowane do pracy w środowisku radiacyjnym. W tym celu została zaproponowana nowatorska metodologia pozwalająca na szacowanie częstości występowania błędów funkcjonalnych w strukturach logicznych zaimplementowanych w SRAM FPGA. Przedstawione i opisane zostały metody zabezpieczania struktur logicznych oparte na redundancji przestrzennej, wykorzystaniu kodów korekcji błędów, odświeżaniu pamięci konfiguracyjnej układów SRAM FPGA oraz potrajaniu układów wejścia-wyjścia. Zaprezentowane zostały również metody testowania polegające na sztucznym wstrzykiwaniu błędów do pamięci konfiguracyjnej układów SRAM FPGA oraz napromieniowywaniu za pomocą testowych wiązek cząstek. Opracowana metodologia pozwala na testowanie odporności radiacyjnej struktur implementowanych w układach SRAM FPGA w laboratorium, bez konieczności wykorzystywania drogiego i czasochłonnego napromieniowywania skracając tym samym czas i obniżając koszt testowania. Autor eksperymentalnie testuje podstawowe typy układów logicznych implementowanych w SRAM FPGA (układy kombinacyjne i sekwencyjne, pamięć blokowa, maszyny stanów) z zastosowaniem różnych technik zabezpieczania przed promieniowaniem. Następnie przeprowadzona zostaje analiza danych eksperymentalnych dla wielu różnych struktur testowych i na podstawie wyników zostają sformułowane zalecenia dotyczące implementacji finalnego projektu dla układu SRAM FPGA, który będzie pracował w systemie odczytu danych dla nowego detektora ITS.

W rozprawie doktorskiej autor zamieszcza również opis zaprojektowanego i uruchomionego przez siebie prototypowego systemu odczytu danych dla detektora ITS. Był on wykorzystywany jako główne narzędzie służące do prowadzenia testów radiacyjnych oraz prac rozwojowych podczas opracowywania systemu odczytu danych do detektora ITS.

dr hab. inż. Piotr Maj
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 Techniki Informacyjnych
Politechniki Warszawskiej z dn. 26 czerwca 2018 roku.

Autor rozprawy: **mgr inż. Krzysztof Marek Sielewicz**

Tytuł rozprawy: **Mitigation Methods Increasing Radiation Hardness of the FPGA-Based Readout of the ALICE Inner Tracking System (Metody zwiększania odporności radiacyjnej dla wewnętrznego systemu śladowego opartego na układach FPGA w eksperymencie ALICE)**

- 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?)****

Przedstawiona do oceny praca doktorska dotyczy badań odporności radiacyjnej oraz podnoszenia tej odporności w standardowych układach FPGA projektowanych bez założenia ich odporności na promieniowanie jonizujące. Praca mgra inż. Krzysztofa Sielewicza ma za zadanie odpowiedzieć na bardzo ważne z punktu widzenia realizacji eksperymentu fizyki wysokich energii, takich jak np. ALICE, pytanie – czy standardowe układy FPGA mogą być wykorzystane w eksperymencie i wskazać właściwą do zastosowania metodę programowania dającą największą odporność na błędy funkcjonalne systemu spowodowane promieniowaniem jonizującym. Autor sformułował tezę, że możliwe jest zaprojektowanie i wdrożenie dla ulepszanego wewnętrznego systemu śladowego w eksperymencie ALICE systemu odczytu, wykorzystującego komercyjne, układy FPGA zawierające statyczne komórki pamięci RAM pod warunkiem, że najpierw zostaną scharakteryzowane a następnie wdrożone metody programowania układów FPGA, pozwalające na eliminację negatywnych skutków promieniowania jonizującego.

Autor pracy w obszernym wprowadzeniu i szczegółowym opisie eksperymentu mówi o skomplikowanej budowie jego systemów detekcyjnych i niemożności wykorzystania do jego budowy układów FPGA

* *Pytania mają charakter pomocniczy, nie stanowią treści recenzji.*

uznanych za odporne radiacyjnie, ze względu na duże ograniczenia na możliwą do zaimplementowania funkcjonalność. Autor przedstawia istniejące już metody zwiększające odporność radiacyjną układów FPGA i wyraźnie stwierdza, że nie ma dzisiaj odpowiedniego kryterium pozwalającego na wybór najlepszej z nich.

Rozprawa ma charakter praktyczno-eksperymentalny, przedstawia szeroki opis samego eksperymentu, wyjaśnia potrzeby wykorzystania metod programowania układów FPGA pozwalających na minimalizację skutków pracy w środowisku promieniowania jonizującego oraz szereg testów w Instytucie Fizyki Jądrowej Czeskiej Akademii Nauk, przeprowadzonych przez autora rozprawy.

- 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?***

Autor rozprawy powołuje się na aż 184 referencje, w znakomitej większości są one datowane po roku 2010, co świadczy o aktualnej wiedzy Autora. Bibliografia, zawiera odnośniki do wysoko punktowanych czasopism z tzw. Listy Filadelfijskiej, jak również do dokumentacji technicznych i zarówno właściwy jest jej dobór jak i wykorzystanie w tekście rozprawy. Wnioski wyciągane przez Autora na podstawie przeglądu cytowanych źródeł korelują z celem pracy i wyraźnie wskazują na możliwość wykorzystania standardowych układów FPGA zawierających komórki pamięci SRAM w środowisku, w którym występuje wysoki poziom promieniowania, takim, jak na przykład eksperyment fizyki wysokich energii. Literatura nie podaje jednak, która z istniejących metod powinna być wybrana dla realizacji systemu odczytowego matryc sensorów pracujących w takim eksperymencie, więc Autor postanowił na to pytanie odpowiedzieć.

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

Autor postawił sobie za cel analizę możliwości wykorzystania układów FPGA wykonanych w standardowej technologii CMOS, w środowisku charakteryzującym się wysokim promieniowaniem jonizującym. Twierdzi, że jest to możliwe pod warunkiem zastosowania stosownych metod programowania układów FPGA eliminujących błędy powodowane przez interakcję cząstek jonizujących z materią układu FPGA. Autor proponuje tutaj nowatorską metodologię pozwalającą na szacowanie częstości występowania błędów funkcjonalnych w strukturach logicznych, która będzie dalej narzędziem pozwalającym na ilościowe i jakościowe porównanie metod zwiększania odporności radiacyjnej układów. Zaproponowana metodologia pozwala na ewaluację testów wykorzystujących promieniowanie jonizujące jak również sztuczne generowanie błędów w pamięci konfiguracyjnej. Autor poddaje testom układy kombinacyjne, sekwencyjne, pamięć blokową oraz architekturę maszyny stanów. Całość pracy pokazuje, że zaproponowana metodologia jest właściwa a przyjęte dla jej realizacji założenia są uzasadnione.

- 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?***

Rozprawa mgra inż. Krzysztofa Sielewicza stanowi domkniętą całość a potrzeba udowodnienia postawionej przez Autora tezy wynika bezpośrednio z konieczności realizacji jednego z najważniejszych dzisiaj konstruowanych eksperymentów fizyki wysokich energii - ALICE. Autor pracy od wstępu po

zakończenie wyraźnie wskazuje na obecny stan wiedzy w omawianym obszarze oraz własne osiągnięcia stanowiące o oryginalności rozprawy oraz samodzielnym dorobku. Na oryginalność rozprawy składa się kilka czynników, z których za najistotniejsze uważam:

- opracowanie przez Autora nowatorskiej metodologii pozwalającej na estymację częstości występowania błędów funkcjonalnych w strukturach logicznych pozwalającej na jakościowe i ilościowe porównywanie metod pozwalających zwiększanie odporności scalonych układów cyfrowych na promieniowanie jonizujące, oraz
- opracowaniu przez Autora koncepcji środowiska symulacyjnego dla testów radiacyjnych na wiązce promieniowania jonizującego oraz poza środowiskiem radiacyjnym przy wykorzystaniu generatora błędów w pamięci konfiguracyjnej; środowisko to umożliwiło przeprowadzenie testów szeregu metod zwiększających odporność układów logicznych na promieniowanie jonizujące zarówno na wiązce promieniowania jak i poza nim.

Konsekwencją przedstawionych oryginalnych osiągnięć pracy jest wybór najlepszej z metod oraz określenie metodologii programowania układów FPGA dla zadań w eksperymencie fizyki wysokich energii. Osiągnięty wynik nie został jak dotąd opisany w znanej mi literaturze i moim przekonaniu stawia ocenianą pracę wysoko w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanego przez literaturę światową.

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

Praca jest napisana w języku angielskim. Pisana jest językiem zrozumiałym, przeprowadza czytelnika przez kolejne poprawnie dobrane rozdziały z zachowaniem odpowiedniego poziomu szczegółowości. Wывody i pojawiające się na końcach rozdziałów komentarze formułowane są w sposób logiczny i przedstawiają oryginalne poglądy autora w sposób przekonujący.

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

Praca stanowi domkniętą całość i jest rozwiązaniem postawionego problemu. Nie zawiera przy tym istotnych wad, niemniej mimo widocznego dużego wysiłku w staranne opisanie wszelkich niejasności, nasuwa się kilka uwag i pytań o charakterze dyskusyjnym, mianowicie:

- W pracy pojawia się duża liczba osobliwych dla danej tematyki akronimów, które nie zawsze są tłumaczone zaraz po ich wystąpieniu i powodują trudności w szybkim zrozumieniu treści. Pomocny jest tutaj spis skrótów obecny na końcu pracy. Kilka skrótów umknęło Autorowi i nie pojawiło się w spisie, np. VTRx i VTTx (wyjaśnienie jest pod rys. 6.3, jednak użyte w treści pracy skróty powinny znaleźć się w ich spisie).
- Prezentacja danych mogłaby być, wg. mnie, lepiej dobrana, głównie dotyczy to:
 - a. wykresów 7.10, 7.11 i 7.12, gdzie, jakkolwiek zachowana jest spójność przedstawiania danych, to generalnie należy unikać pustych wykresów a dane w postaci momentu wystąpienia zdarzenia vs jego miejsce można przedstawić inaczej; sam brak korelacji czasu wystąpienia zdarzenia z miejscem jego wystąpienia można skomentować w tekście pracy,

b. tabeli 7.7 i 7.9, w których zmianom podlega jedynie jedna kolumna, którą można zwizualizować graficznie w formie wykresu; podobnie w formie wykresu można przedstawić tabelę 7.8

- Przedstawiony na rys. 1.11 schemat architektury systemu odczytowego nie został do końca wyjaśniony, dopiero po rozdziale 5 czytelnik domyśla się zastosowania widocznego na rys. 1.11 FLASH FPGA. Schemat widocznego na rys. 1.11 „readout unit” jest różny od układu prototypowego widocznego na rys. 6.2 bez wyjaśnienia, który z nich będzie systemem docelowym i czy widoczny na rys. 1.11 układ FLASH FPGA będzie zastosowany i jaka będzie jego ostateczna funkcja,
- Szerszego niż zostało to zrobione w pracy wymaga opis przechowywania złotej kopii danych konfiguracyjnych wykorzystywanych do ciągłego nadpisywania danych przy operacji *scrubbing*. Autor nie wyjaśnił jaka pamięć została wykorzystana, czy wybrana (lub dana) pamięć nieulotna jest odporna na promieniowanie jonizujące i dlaczego, dlaczego pominięto badania odporności radiacyjnej samego odczytu pamięci nieulotnej.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

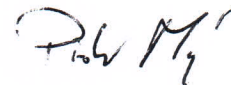
Przydatność rozprawy dla nauk technicznych oceniam wysoko ze względu na fakt, że praca w dużym stopniu przyczynia się do możliwości powstania odpornego na błędy systemu odczytowego w eksperymencie fizyki wysokich energii ALICE w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych. Ponadto pokazuje uogólnioną metodykę weryfikacji odporności radiacyjnej systemów wykorzystujących układy FPGA.

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 EiTI Politechniki Warszawskiej oceniam pracę w podanej skali jako „d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem”.

W konkluzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Krzysztofa Sielewicza pod tytułem *Mitigation Methods Increasing Radiation Hardness of the FPGA-Based Readout of the ALICE Inner Tracking System* spełnia z nadmiarem wymagania *Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym* stawiane rozprawom doktorskim. Wniosuję zatem o jej dopuszczenie do publicznej obrony.



Dr hab. Marcin Konecki
(tel. +48 22 5532820, e-mail: marcin.konecki@fuw.edu.pl)
Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Instytut Fizyki Doświadczalnej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski,
ul. Pasteura 5, 02-093, Warszawa

Warszawa, 15 września 2018 r.

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

Tytuł rozprawy:

Mitigation Methods Increasing Radiation Hardness of the FPGA-Based Readout of the ALICE Inner Tracking System

Autor rozprawy:

mgr Krzysztof Marek Sielewicz

Na wstępie chciałbym podziękować Radzie Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej za powołanie mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr. Sielewicza. Jako fizyk zajmuję się między innymi mionowym systemem wyzwalania detektora CMS, który podobnie jak ALICE, działa przy Large Hadron Collider w laboratorium CERN w Genewie. Do mojej działalności należy m.in. odcodowanie sygnałów pochodzących z odczytu detektorów mionowych, a w przeszłości także pikselowego krzemowego detektora śladowego, podobnie jak IST (Inner Tracking System) w ALICE narażonego na promieniowanie. Dlatego tematyka pracy jest mi bardzo bliska a omawiane w pracy zagadnienia są dla mnie interesujące i zawodowo ważne.

Praca mgr. Sielewicza składa się ze przedmowy, ośmiu rozdziałów (w tym wstępu i podsumowania), bibliografii, listy akronimów i trzech krótkich dodatków.

Pierwszy rozdział pracy zawiera podstawowe informacje o Wielkim Zderzaczach Hadronów (LHC) i eksperymencie ALICE. Autor rozwinął opis detektora ITS dedykowanego do rekonstrukcji śladów cząstek naładowanych, a w szczególności jego układu odczytu oraz środowiska, w którym układ będzie działał. Rozdział ten oceniam bardzo wysoko gdyż pokazuje, że doktorant posiada szeroką perspektywę badawczą niezbędną do właściwego postawienia tezy oraz jej udowodnienia.

W rozdziale drugim autor przedstawia najważniejsze wiadomości dotyczące użycia programowalnych układów w środowisku promieniowania. Autor dyskutuje odporne na promieniowanie układy FPGA oparte o komórki Flash oraz układy jednokrotnego programowania metodą udroźniania (antifuse). Ze względu na specyfikę eksperymentów fizyki cząstek, w tym konieczności częstej zmiany konfiguracji

układu czy złożoność algorytmów, autor skupia się na bardziej pojemnych układach bazujących na technologii pamięci statycznej, tj. SRAM FPGA. Układy te są podatne na efekty związane z oddziaływaniem promieniowania jonizującego. Autor dzieli je na kumulujące się, powodujące postępującą degradację układu oraz pojedyncze tzw. SEEs (Single Event Effects), wśród których wyróżniane są podklasy, przy czym te najbardziej groźne dla SRAM FPGA są pokrótce omówione. Wśród dyskutowanych efektów są SEU (Single Event Upset) - niedestrukcyjne zmiany stanu elementów układu. Autor podaje oczekiwane dawki radiacyjne w obszarze działania elektroniki odczytu ITS. Na zakończenie dyskutuje ogólną metodologię pomiarów pozwalających na określenie podatności SRAM FPGA na promieniowanie. Podkreśla konieczność badania efektów kumulacyjnych oraz typu SEL (Single Event Latch-Up) prowadzących do uszkodzenia układu, obszernie odnosząc się do literatury.

Krótki rozdział trzeci to przede wszystkim przedstawienie hipotezy badawczej i celu pracy. Autor postuluje możliwość zastosowania układów SRAM FPGA do odczytu ITS ALICE w obszarze promieniowania, pod warunkiem zbadania i zaimplementowania metod osłaniających funkcjonalność układu (autor używa słowa 'mitigation', czyli metod łagodzących efekty radiacyjne).

W kolejnym, czwartym rozdziale, autor koncentruje się na sposobie emulacji efektów dysfunkcji zachowania układu (błędów funkcjonalnych) ze względu na pojawiające się na efekty radiacyjne. W istocie pomysł autora sprowadza się do emulacji wielu linii składających się z łańcuchów LTS (Logical Test Structure), wprowadzeniu błędów (radiacyjnych), które naśladują efekty promieniowania oraz porównanie wyniku na końcu łańcuchów z przewidywaniem. O ile liczba wprowadzanych błędów jest zadana przez środowisko radiacyjne to liczba błędów funkcjonalnych na końcu łańcucha może być różna ze względu na różne sposoby maskowania efektów radiacyjnych. W rozdziale tym autor wyznacza liczbę błędów radiacyjnych przez przekrój czynny, natężenie wiązki, czas naświetlania oraz rozmiar badanego układu (w bitach). Przekrój czynny na zdarzenie, będący w istocie miarą prawdopodobieństwa, pojawia się w wielu miejscach pracy w nieco różnych kontekstach. W szczególności jest to dla autora ważna miara określająca efektywną odporność na niepożądane efekty radiacyjne.

Rozdział piąty to dyskusja metod osłaniających funkcjonalność układu od błędów radiacyjnych. Autor pokrótce dyskutuje architekturę DMR (Dual Modular Redundancy) umożliwiającą sygnalizowanie błędu i skupia się na wariantach TMR (Triple Modular Redundancy), gdzie dzięki potrójnej nadmiarowości można nie tylko zasygnalizować błąd, ale i zachować niezaburzone działanie układu. Dyskutowane są też metody przywracania funkcjonalności układu przez periodyczne odświeżanie jego konfiguracji, a także wprowadzanie redundancji na wejściach i wyjściach. Autor podkreśla konieczność łączenia przedstawionych metod dla niezawodnego działania układów w środowisku promieniowania jonizującego.

W rozdziale szóstym omówiony jest prototyp płyty odczytu detektora ITS, której najważniejszym i jednocześnie podatnym na promieniowanie składnikiem jest układ SRAM FPGA typu Kintex-7

XC7K325T firmy Xilinx. Badaniu różnych metod łagodzenia skutków radiacyjnych dla tego układu poświęcony jest najbardziej obszerny, siódmy rozdział pracy.

W rozdziale siódmym badany jest wpływ błędów radiacyjnych na funkcjonalność układu Kintex-7. Autor nie implementuje pełnego algorytmu przetwarzania danych ALICE, ale identyfikuje typowe struktury logiczne (układy kombinacyjne i sekwencyjne, pamięci blokowe, maszyny stanów) i bada ich podatność na błędy radiacyjne bez stosowania, oraz z zastosowaniem, metod osłonowych zaproponowanych w rozdziale 5. Badanie to przeprowadzane jest dwojako: przez zliczanie błędów funkcjonalnych przy bezpośrednim naświetleniu układu wiązką protonową w laboratorium Instytutu Fizyki Jądrowej Akademii Nauk w Republice Czeskiej w Reż koło Pragi, oraz przez zliczanie błędów funkcjonalnych przy emulowaniu w układzie błędów radiacyjnych. Autor naświetla przez określony czas (np. 120 s) układ, licząc błędy funkcjonalne pierwszą metodą. Pojedynczy eksperyment jest powtarzany (np. 50 razy), ale liczba powtórzeń jest ograniczona przez dostępność i koszt działania wiązki. Jednocześnie korzystając ze wzoru 7.1 autor oblicza ile błędów radiacyjnych w układzie powinno się pojawić (np. 408). Umożliwia to naśladowanie i wielokrotne powielanie eksperymentu wiązkowego drugą metodą, tj. z emulacją błędów. Ten eksperyment autor wykonuje wielokrotnie (np. 500 razy), badając liczbę funkcjonalnych błędów i ostrzeżeń. Wyniki otrzymane obiema metodami porównywano, np. w tabeli 7.4 i 7.5. Procedura taka jest w pełni poprawna, mój niedosyt budzi jednak brak dyskusji statystycznej, np. autor podaje SD czy error σ , ale nigdzie się do tego nie odnosi. Oczywiście nie wpływa to na wagę wyników zawartych w tabeli 7.14, ani rekomendacji implementacji powstałych w wyniku interpretacji rezultatów i podsumowanych w tabeli 7.15.

Pozwolę sobie podkreślić, że choć w pracy eksperyment na wiązce traktowany jest jako potwierdzający jedynie eksperyment emulatorowy, to traktuję ten element jako bardzo ważny składnik doktoratu, świadczący o wybitności autora i jego dojrzałym podejściu do postawionego sobie zadania. Jednocześnie uważam, że przeprowadzone w ramach pracy działania badawcze są w pełni właściwe dla wybitnej pracy doktorskiej.

Po tym ogólnym przeglądzie, chcę się teraz odnieść do konkretnych pytań zawartych w kwestionariuszu recenzji.

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

Zagadnieniem, które rozpatruje mgr Krzysztof Sielewicz jest możliwość użycia w odczycie detektora ITS eksperymentu ALICE układów SRAM FPGA podatnych na efekty promieniowania, pod warunkiem wprowadzenia metod osłaniających funkcjonalność układu. W tym celu autor pracy metody te identyfikuje, proponuje metodologię porównawczą a następnie te metody bada.

Teza pracy jest bardzo jasno sformułowana przez autora i niewątpliwie łatwo widoczna dla recenzenta, gdyż autor poświęcił temu osobno ujęty w spisie treści rozdział, a samo sformułowanie hipotezy zamieścił w ramce.

Autor określa swoją pracę jako doświadczalną, choć ja klasyfikuję ją jako doświadczalno-teoretyczną, ponieważ autor na gruncie rozważań teoretycznych proponuje praktyczne metody zapobiegania niekorzystnym zjawiskom radiacyjnym, następnie je doświadczalnie bada i wyniki analizuje.

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

Bibliografia przedstawionej do recenzji pracy liczy 184 pozycje. Są to w dużej mierze publikacje w czasopiśmie naukowych, ale też publikacje pokonferencyjne i specyfikacje elektroniczne. Literatura odnosi się do wszystkich dyskutowanych w pracy zagadnień, w tym fizycznych, i prezentuje bieżący stan wiedzy. Wśród cytowanej literatury są trzy pozycje, których mgr Sielewicz jest współautorem, z czego dwie to publikacje w rozpoznawalnym „Journal od Instrumentation”. Bibliografię uważam za niebudzącą zastrzeżeń i kompletną. Wybór literatury świadczy o dużej wiedzy autora.

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

Autor w pełni udowodnił tezę pracy i przedstawił praktyczne rozwiązanie, które może być wdrożone. Poprzez przeprowadzenie doświadczenia na wiązce autor wprost wykazał, że przeprowadzona symulacja jest w pełni wiarygodna.

Pewne wątpliwości może budzić wybór przekroju czynnego jako kryterium porównawczego metod. Układ odczytu ITS stanowi bardzo ważny, ale ciągle jeden z wielu składników, którego poprawne funkcjonowanie jest konieczne do działania eksperymentu ALICE. W tak dużym eksperymencie kluczowe jest zapewnienie możliwie bezawaryjnego zbierania danych o możliwie najlepszej jakości. Dla pojedynczego podsystemu oznacza to, że powinien sam zdiagnozować problem i naprawić go, bez konieczności czasowo kosztownego przerywania zbierania danych całego detektora. Faktycznym wyznacznikiem pozostaje wówczas nie przekrój czynny świadczący o pojawieniu się błędu, naprawianego wszakże przez cykliczną rekonfigurację, tylko efektywność przesyłania dobrych danych. Tę efektywność należy zdefiniować jako czas poprawnego działania podsystemu w czasie zbierania danych eksperymentu. Najprostszą metodą zaprojektowania systemu spełniającego taki warunek wydaje się być podwojenie w układzie całej logiki w architekturze DMR i w razie stwierdzenia błędu wewnętrzna rekonfiguracja układu „na żądanie”, niezależnie od wówczas możliwie rzadszych przeładowań cyklicznych. Oczywiście zastosowanie tu TMR jest ciągle lepsze, ale używa więcej zasobów.

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?

Oryginalność rozprawy zawarta jest w udowodnionej hipotezie. Powtarzając, polega na możliwości użycia w środowisku radiacyjnym układów SRAM FPGA, pod warunkiem zastosowania badanych przez autora metod osłonowych. Przykładowy zysk z ich zastosowania przedstawiony jest w tabeli 7.14. Autor podsumowuje swoje badania w postaci „rekomendacji” implementacyjnych zawartych w tabeli 7.15. Drugim, innowacyjnym elementem jest zaproponowanie software’owego narzędzia diagnostyki pozwalającego na zbadanie wpływu SEU na funkcjonalność układu. Autor potwierdził funkcjonalność narzędzia poprzez porównanie wyników emulacji z naświetlaniem układu na wiązce. Osiągnięto zgodność rezultatów. Są to samodzielne i oryginalne osiągnięcia autora.

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

Przedstawiona mi do recenzji praca jest niemal wzorcowo zaprojektowana. Układ pracy jest bardzo czytelny. Praca napisana jest też bardzo dobrym, ale i jednocześnie przejrzystym językiem angielskim. Praca jest jasna i zwięzła, choć autor nie ustrzegł się pomniejszych błędów redakcyjnych:

- Akronimy:
Praca ze względu na precyzyjne słownictwo zawiera dużą liczbę akronimów. Ogromnym ułatwieniem jest czterostronicowy ich słownik. W pracy jest jednak duża niekonsekwencja przy wprowadzaniu i używaniu akronimów. Mamy takie skrótowce (jak np. Inner Tracking System - ITS), które wprowadzane są kilkakrotnie, i co więcej po wprowadzeniu dalej używane jest rozwinięcie akronimu. Mamy akronimy jednorazowo wprowadzone i nigdzie już nie użyte (np. HLT). Kilka akronimów znajduje się w spisie, ale w tekście są tylko ich pełne rozwinięcia (IP, QGP). Są akronimy wprowadzone (OL,ML,IL) , ale nie umieszczone w spisie. Udało mi się znaleźć też akronim najpierw użyty a dopiero potem wprowadzony: LS2. Mamy też SD (należy zgadywać, że to Standard Deviation), którego rozwinięcie nie pojawia się ani w tekście, ani w spisie.
- Głębokość tunelu LHC – miejscami znacznie przekracza 100 m. Autor podaje 50-75m.
- Rys. 1.11: linie kontroli zaznaczone są jako dwustronne, w opisie ‘downstream’.
- Rys. 1.4: opis rys. na stronie 21 nie w pełni pasuje do rysunku. W tekście dyskutowany jest podział na Inner Barrel i Outer Barrel zaś na rysunku są Outer Layers, Middle Layers i Inner Layers. Odwołanie do nich jest dopiero pod koniec rozdziału.
- W opisie do rysunku 2.3b jest mowa o dwóch rejestrach, na rysunku są 4.

- Rozdział 7.2.1: generator wzorców, porównywacz i dyskryminator zgodnie z opisem w tekście są potrojone, co jest kluczowe dla przeprowadzonych badań. Dużym ułatwieniem dla czytelnika byłoby zaznaczenie tego na rysunkach.
- Najpierw jest odnośnik do rys 7.6 dopiero potem do 7.5.
- Streszczenie pracy jest w istocie skrótem przedmowy. Nie zawiera streszczenia osiągniętych rezultatów, a np. liczbę sensorów MAPS, która tu jest niepotrzebna.
- W rozdziale 7 pojawiają się niewielkie powtórzenia tych samych informacji (np. w 7.3.2 i 7.4.2).
- Ważny fragment dotyczący otrzymania N_ERR_CB ze wzoru 7.1 napisany jest dość niejasno. Autor nie odwołuje się do dodatku A i B skąd pobrane są dane niezbędne do wyliczeń.
- Nie jest jasne, które dokładnie wartości użyto do policzenia wielkości w tabeli 7.14.

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

Wśród wielu pozytywów pracy znaleźć można kilka słabszych miejsc. Jako, że rolą recenzenta jest trochę poszukiwanie dziury w całym pozwolę sobie zwrócić uwagę na drobne niedoskonałości pracy:

- W pracy nie są podane rozmiary układu, który był naświetlany. Nie jest też podany konkretny typ (package) układu XC7K325T. Zakładając, że układ naświetlany wiązką to ten z fotografii 6.2 to jest to FFG900 i ma on rozmiary obudowy (mm) 31x31, czyli jest większy niż podany przez autora rozmiar obszaru jednorodności wiązki ($2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$). Użyte przez autora wzory (np. 7.1) zakładają, że rozmiar układu jest mniejszy niż rozmiar wiązki. Dyskusję powyższego pominięto w pracy.
- Kluczowe dla pracy jest określenie natężenie promieniowania, w którym umieszczony będzie układ odczytu ITS. Autor podaje i korzysta z wartości $10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Jednocześnie na zamieszczonym rysunku 1.12 odczytałem jedynie ok. $1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.
- Uważam, że tytuł pracy, szczególnie ten podany w języku polskim, jest nieco mylący. Autor w istocie nie dyskutuje metod zwiększających odporność radiacyjną układu (fragment tytułu w j. polskim) a sposoby implementacji zwiększające jego sprawne działanie, tj. ukrywanie problemów radiacyjnych. O ile tytuł angielski lepiej oddaje zawartość pracy niż polski to i tu raczej użyłbym terminu 'radiation tolerance' zamiast 'radiation hardness'.
- Autor nie podnosi wątku zależności częstości SEE od historii płyty (TID).
- Na rys. 7.12 za linią czerwoną pojawiają się jeszcze punkty nie przechodzące w linię, co się nie powinno zdarzyć.
- Podobne w kilku miejscach przekroje czynne przy i bez stosowania odświeżania konfiguracji (np. „registers triplicated” w tabelach 7.4 i 7.5) przekładają się na zupełnie inne działanie układu, czego autor nie komentuje.

- Oczekiwałbym w pracy pełniejszego uzasadnienia, że efekty kumulacyjne oraz SEL nie mają wpływu na działanie układu odczytu ITS.

Powyższe uwagi nie umniejszają mojej bardzo dobrej merytorycznej oceny tej pracy.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Autor dyskutuje zagadnienie mające bezpośrednie zastosowanie tam gdzie nauki techniczne wspierają działania wymagające zastosowań układów FPGA w miejscach narażonych na promieniowanie. W szczególności autor udowadniając tezę wykazał efektywną możliwość zastosowania pojemnego i relatywnie niedrogiego układu typu SRAM FPGA w środowisku radiacyjnym detektora ALICE.

Uważam, że przydatność tych badań dla nauk technicznych jest bardzo duża.

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

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji praca spełnia wymagania dotyczące rozpraw doktorskich, dlatego wnioskuję o dopuszczenie mgr. Krzysztofa Marka Sielewicza do jej publicznej obrony.

Chciałbym podkreślić wagę tematyki pracy, jej interdyscyplinarność, i wielki wysiłek, który doktorant musiał włożyć w przygotowanie układu doświadczalnego. Uważam, że praca jest wybitnie dobra i zasługuje na wyróżnienie, o które niniejszym wnioskuję. Na zakończenie chciałbym dodać, że lektura pracy była bardzo ciekawa.

Dr hab. Marcin Konecki



