

Gliwice, 19.02.2024 r.

dr hab. inż. Robert Czerwiński, prof. PŚ
Katedra Systemów Cyfrowych
Politechnika Śląska

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 26.02.2024

Zarejestrowano pod nr

Podpis *Jm*

Recenzja pracy doktorskiej

Tytuł rozprawy: **Rozwój scalonych systemów mikroprocesorowych dla hybrydowych detektorów promieniowania jonizującego**

Autor rozprawy: mgr inż. Paweł Skrzypiec

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Robert Szczygieł, prof. AGH

Dyscyplina: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Skrzypca, która została opracowana na zlecenie wyrażone w piśmie z dnia 15. grudnia 2023 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej, dr. hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH. Przewód doktorski jest prowadzony na podstawie przepisów określonych przez Ustawę z dnia 20. lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023, poz. 742).

1. Zakres i cel rozprawy

Tematem rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Skrzypca jest scalony system mikroprocesorowy z hybrydowym detektorem promieniowania jonizującego. Praktyczne zrealizowanie idei przetwarzania brzegowego (ang. edge-computing) umożliwia opracowanie efektywnego energetycznie i wydajnego systemu. Rozwój nauki w obszarze fizyki wysokich energii, medycyny i era eksploracji kosmosu uzasadniają podjęte prace. Doktorant zaprojektował i wykonał specjalizowany układ scalony w technologii CMOS 40 nm, integrując pikselowy czujnik hybrydowy z systemem mikroprocesorowym. Tematykę doktoratu uważam zatem za aktualną i ważną.

Cel pracy jest postawiony już we wstępie (strona 4) w następujący sposób:

„Celem opisanych w rozprawie prac jest wykorzystanie zalet przetwarzania brzegowego w hybrydowych detektorach promieniowania jonizującego.”

Tak sformułowany cel odnosi się do bardzo krótkiego (około jednej strony) wprowadzenia zawierającego jedynie ogólne hasła i idee. Uważam go za nazbyt ogólny.

Czerwiński

Realizację celu pracy Doktorant zaplanował w trzech punktach (strona 4). W pierwszym punkcie za zadanie postawił sobie „opracowanie scalonego układu odczytowego do hybrydowego pikselowego detektora promieniowania jonizującego, z wbudowanym mikroprocesorem, który rozszerzy możliwości istniejących rozwiązań”. Nie bardzo wiadomo w jaki sposób opracowanie układu „rozszerzy możliwości” i jakie „istniejące” rozwiązania Autor rozprawy ma na myśli. Dwa kolejne zadania:

„2. opracowanie oprogramowania wymaganego do poprawnego działania skonstruowanego systemu,
3. opracowanie systemu (sprzętu i oprogramowania) do testowania, który:

- umożliwi sprawne przetestowanie skonstruowanego układu po jego wyprodukowaniu,
- pozwoli na weryfikację części cyfrowej projektowanego układu już na wstępnym etapie prac projektowych.”

mają charakter czysto inżynierski.

Bardzo istotnym brakiem w zakresie celów jest scharakteryzowanie detektora i określenie jego zastosowania (Doktorant nie zrobił też tego nigdzie w dalszej części rozprawy). Jakie promieniowanie jonizujące Doktorant ma na myśli? Przecież od tego w bardzo silnym stopniu będzie zależał projekt i implementacja.

Uważam, że cel i zakres naukowy rozprawy nie jest jasno sformułowany. W rozprawie Doktorant nie postawił tezy naukowej.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska napisana jest w języku polskim. Składa się z pięciu rozdziałów, streszczeń (w języku angielskim i polskim), bibliografii, spisów i dodatków. Analizując strukturę przedstawionej dysertacji oceniam, że jest poprawna, ale poszczególnym fragmentom brakuje bardzo istotnych treści.

W rozdziale pierwszym, po jednostronicowym wstępie, Doktorant przedstawił cel i trzy zadania, za pomocą których cel ma być osiągnięty. Trochę zaskakujący jest następny akapit, w którym Doktorant podsumowuje zrealizowane prace.

Wprowadzenie do tematyki rozprawy jest przedstawione w Rozdziale 2. Najpierw zarysowana jest ogólna wiedza dotycząca systemów mikroprocesorowych (Rozdział 2.1.1) – powiedziałbym, że na poziomie podręcznikowym, ale z zadziwiającymi wnioskami, w których już na tym etapie (bez analiz) pojawia się wniosek zastosowania mikroprocesora z rodziny RISC-V. Następnie, skrótowo przedstawione zostały zagadnienia związane z architekturą systemów mikroprocesorowych. Po tym Doktorant od razu zaczął opisywać mikroprocesor RISC-V. Chociaż jestem wielkim entuzjastą mikroprocesorów z rodziny RISC-V, to spodziewałbym się tutaj dogłębnej analizy, przedstawienia

Gorwini

stanu techniki w obszarze stosowanych współcześnie mikroprocesorów. Model dystrybucji i rosnąca popularność (wniosek Doktoranta ze strony 16) nie może być podstawowym kryterium wyboru danej jednostki. Przecież popularny w zastosowaniach wbudowanych jest również ARM – mikroprocesor z rodziny Cortex M0 bardzo dobrze by się sprawdził w przetwarzaniu brzegowym. Zdecydowanie brakuje go w analizie, jak również innych rozwiązań!

Rozdział 2.2 poświęcony jest pikselowym układom odczytowym. W stosunku do zawartości Rozdziału 2.1, gdzie autor przedstawia nawet budowę bramki NOT w technologii CMOS, mam duży niedosyt. Opis czujników jest bardzo ogólny i skrótowy. Dla projektowanego systemu nie są ważne tylko interfejsy, ale też zasada działania, zjawiska i na przykład wady (np. skoro ma być zrealizowany mechanizm kalibracji). Nie są przedstawione specyfikacje techniczne porównywanych czujników, ich zakres zastosowań, etc.

Rozdział 3 powinien być najistotniejszym z punktu widzenia tematyki rozprawy. W Rozdziale 3.1 Doktorant przedstawia ogólną architekturę systemu, w 3.2 oprogramowanie, a w 3.3 jest opisany opracowany mikroprocesor RISC-V. Cały rozdział jest niestety napisany bardzo skrótowo i brakuje istotnych fragmentów, które pozwoliłyby ocenić poprawność przyjętych założeń i opracowanych rozwiązań.

Architektura sprzętowa jest przedstawiona w Rozdziale 3.1. Doktorant pokazuje tylko bardzo ogólne treści oraz schematy blokowe (np. Rys. 3.1), które nie zdradzają żadnych szczegółów. Dobór mikroprocesora Ibex wydaje się odpowiedni. Wynika to jednak z mojego doświadczenia, bo Doktorant nie przedstawia wymagań, założeń, analizy i porównania różnych rdzeni. Podobnie lakonicznie opisane są inne elementy systemu, a opis topografii układu scalonego sprowadza się do dwóch krótkich akapitów (Rozdział 3.1.5) oraz dwóch rysunków przedstawiających plan masek litograficznych (Rys. 3.4a) i fotografię mikroskopową (Rys. 3.4b). Gdzie na Rys. 3.4a znajduje się mikroprocesor i inne elementy systemu mikroprocesorowego? Drugi z tych rysunków niczego do pracy nie wnosi. Z resztą, przy okazji czytania Rozdziału 3.1 pojawia się szereg pytań i wątpliwości. Najważniejsze z nich to: jak wygląda mikroarchitektura układu, jak zostały opisane kluczowe elementy sprzętowe (HDL), jak wygląda struktura sieci zegarowej (ile jest domen zegarowych, jak ew. zrealizowane są przejścia międzydomenowe CDC), jakiego typu są poszczególne magistrale?

W Rozdziale 3.1 Doktorant pokazuje zastosowanie kontrolera matrycy pikseli PMC, który sprzętowo wspiera mikroprocesor sterujący. Dzięki takiemu podejściu, odczyt matrycy pikseli jest zrealizowany znacząco szybciej – o ~97% względem trybu bezpośredniego.

Rozdział 3.2 poświęcony jest oprogramowaniu systemu. Mam tutaj takie same uwagi, jak do części przedstawionej w Rozdziale 3.1 – nazbyt ogólne i niewiele zdradzające opisy. Trudno ocenić jakość takiego rozwiązania. Pewien problem mam również z wnioskiem przedstawionym na stronie 35: „Przeprowadzony eksperyment wykazał, że wykorzystanie mikroprocesora RISC-V do transmisji danych z pikseli spełniających zadane kryterium może znacznie skrócić czas potrzebny na transmisję danych (...)”. W mojej opinii to nie wykorzystanie mikroprocesora RISC-V przyczynia się do skrócenia czasu, ale zastosowanie odpowiedniego algorytmu odczytowego. W Rozdziale 3.2 oczekiwałbym też

Czerwinski

przedstawienia pełnej procedury (algorytmu) kalibracji/autokalibracji detektora promieniowania. To istotne, bo jak rozumiem, to jeden podstawowych celów zastosowania w detektorach przetwarzania brzegowego.

Doktorant opracował swój rdzeń RISC-V oparty o wybrane elementy części I specyfikacji ISA mikroprocesora RISC-V. Projekt nie został jednak przedstawiony. Rysunek 3.5 przedstawia bardzo ogólną strukturę bloków powiązanych z fazami realizowanego rozkazu, jednak nie pokazuje nawet jak zrealizowane jest przetwarzanie potokowe i gdzie znajdują się rejestry poszczególnych stadiów potoku. Inne ważne elementy też nie są przedstawione. Na przykład nie jest przedstawiona lista instrukcji. Ze schematu przedstawionego na Rys. 3.5 wynika, że mikroprocesor nie zawiera skoków. Czy tak jest w rzeczywistości? Trudno określić. Ponadto, jednym z argumentów stojących za wyborem mikroprocesora RISC-V była możliwość zrealizowania swoich rozszerzeń. Czy to jest w pracy zrealizowane? Jeżeli tak, to jakie rozszerzenia do specyfikacji ISA zostały dodane?

Idąc dalej, Doktorant porównuje swój rdzeń 'rcore' z rdzeniem Ibex wykazując, że w pewnych obszarach jest znacząco lepszy. W końcu, Doktorant zmodyfikował układ zarządzania „magistralą instrukcji”, uzyskując dalszą poprawę szybkości systemu. Wyniki porównań (pod względem liczby cykli zegara potrzebnych do realizacji zadania) są przedstawione w rozdziale, część tych wyników ma charakter symulacyjny. Uzyskane wyniki są jednak dyskusyjne. Po pierwsze, w mojej opinii rdzeń Ibex realizuje wyniki instrukcji 'Integer Computatinal' w jednym taktie, chociaż istotnie potok ma dwie warstwy, co stoi w sprzeczności z wnioskiem ze strony 37/38: „(...) w przypadku zaprojektowanego mikroprocesora wykonanie najkrótszej instrukcji trwało jeden takt zegara systemowego, podczas gdy w przypadku rdzenia Ibex czas ten był dwukrotnie dłuższy.”. Po drugie – opracowany układ zarządzania „magistralą instrukcji” znacząco poprawiło wyniki uzyskiwane dla rdzenia Ibex (strona 41; wyniki oznaczone w rozprawie jako „Ibex+”). Potwierdzałyby to tezę, o wyznaczaniu wyników części instrukcji przez rdzeń Ibex w każdym taktie.

Rozdział 4.1 w zdecydowanej większości poświęcony jest budowie stanowiska służącego do testowania opracowanego układu scalonego. Zgodzę się, że tutaj opisy na ogólnym poziomie są właściwe, chociaż często zdradzają więcej szczegółów niż zasadnicza część projektu. Zastanawia mnie użycie magistrali PCIe do weryfikacji czujników, z którymi środowisko komunikuje się za pomocą interfejsu UART. Z całą pewnością wymagało to żmudnej i czasochłonnej pracy. W mojej opinii, lepiej było spożytkować tę energię na przeprowadzenie kampanii środowiskowej z opracowanym układem scalonym. Rozdział 4 kończy przedstawienie testów przetworników korygujących napięcia niezrównoważenia dyskryminatorów. Uważam to za cenny wkład, uzasadniający wybór niektórych elementów opracowanej architektury.

Bibliografia cytowana w pracy zawiera 65 pozycji, wliczając w to prace Doktoranta. Dobrana literatura jest odpowiednia dla prezentowanych w dysertacji zagadnień. Raczej mam uwagi do samego doboru treści, czemu wyraz dałem wcześniej.

Jak zaznaczyłem wcześniej – Rozdział 3 powinien być kluczowym, w którym Doktorant przedstawia wymagania, założenia, analizy. Tymczasem, tego w pracy praktycznie nie ma, a opisy zrealizowanych

Czerwik, M.

elementów są aż nazbyt ogólne. Trudno oprzeć się wrażeniu, że przedstawiona rozprawa ma charakter bardziej autoreferatu niż rzeczywistego opracowania naukowego, w którym autor precyzyjnie opisuje osiągnięcia naukowe i inżynierskie.

Najważniejsze dla mnie braki rozprawy wiążą się z procesem projektowania i analizą tematu. Doktorant nie przedstawia zakresu zastosowania czujników, ich specyfikacji oraz przeznaczenia. A to bardzo ważne informacje w kontekście projektowania systemu cyfrowego. Promieniowanie jonizujące może mieć zdecydowanie negatywny wpływ na działanie systemu. Na przykład pamięci RAM znajdują się w pobliżu matryc pikseli (Rys. 3.5). Zjawiska związane z uszkodzeniami jednokrotnymi SEE (ang. single-event effect; rozumiane jako grupa zagadnień radiacyjnego wpływu na układy elektroniczne) są całkowicie pomijane w tym kontekście. Zjawiska te mogą mieć podobnie negatywny wpływ na działanie samego mikroprocesora. Jak mikroprocesor został zabezpieczony przed efektami promieniowania jonizującego? Spodziewałbym się w pracy analizy na ile potrójna redundancja modułarna TMR (ang. tripple modular redundancy) jest niezbędna i zadowalająca – spełniająca oczekiwania przy zwiększonej powierzchni systemu. Jakie inne elementy łagodzenia skutków promieniowania można/należy rozważyć (ang. radiation mitigation, ang. radiation hardening)?

3. Najważniejsze osiągnięcia rozprawy

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć przedstawionej rozprawy zaliczam:

- opracowanie i zrealizowanie systemu mikroprocesorowego zintegrowanego z pikselowym czujnikiem promieniowania jonizującego.

Niestety, Doktorant nie przedstawił w rozprawie żadnych analiz **naukowych** uzasadniających przyjętą koncepcję rozwiązania. Opracowany system nie został przebadany w zastosowaniu promieniowania jonizującego, co stawia jego funkcjonalność pod dużym znakiem zapytania. Chociaż opracowanie układu scalonego uważam za bardzo duże i ważne osiągnięcie, to niestety wciąż jest to praca inżynierska. Cenne jest wstępne przebadanie opracowanego detektora i zrealizowanie kalibracji oraz przedstawienie wyników tych prac.

4. Uwagi krytyczne

Uwzględnienie choćby części uwag przedstawionych wcześniej znacząco poprawiłoby jakość rozprawy. Zaś w tej części mojej recenzji zamieszczam uwagi dotyczące treści, wprowadzenia których oczekuję do rozprawy. W mojej opinii, bez nich ocena rozprawy nie może być pozytywna.

- 1) W pracy musi być przedstawiony cel (cele) naukowe oraz postawiona teza. Oczywiście cele muszą być zrealizowane, a teza udowodniona (analitycznie lub eksperymentalnie).
- 2) Praca musi zawierać:

Grzegorz

- a. Informacje związane ze specyfikacją i zakresem zastosowania opracowanego czujnika. Informacje o charakterze badanego promieniowania jonizującego.
 - b. Dogłębną analizę wpływu SEE badanego promieniowania jonizującego na część cyfrową układu scalonego, w tym przede wszystkim na mikroprocesor i pamięci RAM. Dobór możliwych zabezpieczeń i rozwiązań łagodzących skutki promieniowania jonizującego, jak np. TMR i analiza tych rozwiązań (mogą być symulacyjne lub analityczne).
- 3) Opracowany detektor (ten obecny) powinien być przebadany przez poddanie go promieniowaniu jonizującemu w zakresie określonym przez Doktoranta (w punkcie 4.1.a). Musi być zbadana funkcjonalność uzyskanego rozwiązania i wpływ promieniowania jonizującego na elementy systemu cyfrowego (przynajmniej symulacyjnie). Wyniki oraz wnioski należy przedstawić w poprawionej rozprawie.

5. Podsumowanie

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska prezentuje ogólny zarys projektu układu scalonego. Widzę w tej pracy bardzo duży potencjał, jednak brak poważnych analiz naukowych opracowanego systemu (układu scalonego) i brak badań funkcjonalnych z promieniowaniem jonizującym, uniemożliwia postawienie pozytywnej konkluzji. Uważam, że zgodnie z Ustawą o stopniach i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789), oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, recenzowana praca doktorska w obecnym kształcie nie spełnia wymagań stawianych rozprawom doktorskim, dlatego wymaga wprowadzenia istotnych poprawek oraz ponownego recenzowania.

Robert Czerniński