


Dr hab. inż. Grzegorz Blakiewicz, prof. PG
Politechnika Gdańska
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Katedra Systemów Mikroelektronicznych
ul. Gabriela Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
tel.: 583482478
e-mail: grzegorz.blakiewicz@pg.edu.pl

Gdańsk, 17.01.2024

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 24.01.2024
Zarejestrowano pod nr
Podpis 

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Skrzypca

pt. Rozwój scalonych systemów mikroprocesorowych dla hybrydowych detektorów promieniowania jonizującego

Podstawą opracowania recenzji jest Uchwała Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie z dnia 14.12.2023. Ocena rozprawy została wykonana zgodnie z przepisami Ustawy z dnia 20.07.2018, Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023, poz.742).

1. Temat pracy i jego znaczenie

Rozprawa doktorska dotyczy wybranych aspektów projektowania specjalizowanych układów scalonych ASIC (ang. *application-specific integrated circuit*) przeznaczonych do współpracy z hybrydowymi pikselowymi detektorami promieniowania jonizującego oraz systemu pomiarowego dostosowanego do testowania tego rodzaju detektorów. Detektory pikselowe składają się z wielu elementarnych komórek nazywanych pikselami, których zadaniem jest detekcja promieniowania jonizującego i przetwarzanie go na postać sygnałów elektrycznych. W typowych rozwiązaniach, piksele są rozmieszczone na określonej powierzchni tworząc matrycę wytwarzającą obraz przestrzennego rozkładu rejestrowanego promieniowania. W efekcie, nawet w detektorach pikselowych o relatywnie niewielkich rozmiarach (np. 128 x 128 pikseli) wytwarzany jest olbrzymi strumień danych (ponad 16 tysięcy słów np. 8-bitowych), który należy w szybki i efektywny sposób przetwarzać. Innym bardzo istotnym zagadnieniem dotyczącym zintegrowanych detektorów pikselowych są wady obrazu wytwarzanego przez matrycę. Ze względu na niedoskonałości technologii wykorzystywanych do wytwarzania matrycy pikseli oraz bloków funkcyjnych współpracujących z pikselami, obserwuje się różnice w charakterystykach poszczególnych pikseli tworzących matrycę. Ta niekorzystna cecha jest odpowiedzialna, między innymi, za generowanie przez detektor pikselowy niejednorodnego obrazu w sytuacji gdy detektor jest poddawany równomiernemu napromieniowaniu jonizującemu. W efekcie powstaje fałszywy obraz, który może być błędnie zinterpretowany. Ze względu na tę i inne wady detektorów pikselowych zintegrowanych z użyciem technologii CMOS konieczna jest kalibracja torów odczytowych pikseli i wstępne przetwarzanie obrazu wytwarzanego przez matrycę. Ze względu na te właściwości pikseli oraz wspomniane już bardzo wysokie wymagania związane z olbrzymim strumieniem danych bardzo dużego znaczenia nabiera projektowanie efektywnych obwodów realizujących funkcje sterujące i odczytowe. Równie ważne jest dysponowanie wyspecjalizowanym systemem pomiarowym umożliwiającym testowanie i kalibrację prototypowych sensorów.

Podjęcie przez Autora wysiłku poszukiwania architektury i specyficznych rozwiązań sprzętowo-programowych pozwalających poprawić jakość rejestrowanego promieniowania jonizującego oraz efektywność wstępnego przetwarzania sygnałów z matrycy pikselowej ma bardzo duże znaczenie praktyczne, szczególnie w rozwoju metod diagnostycznych oraz udoskonalania autonomicznych systemów detekcji i nadzoru procesów technologicznych. Należy również podkreślić, że zagadnienia, nad którymi pracował Autor mają znacznie szerszy zakres zastosowań niż tylko hybrydowe pikselowe detektory promieniowania jonizującego. Podobne problemy dotyczą matryc pikselowych służących do rejestracji światła widzialnego, a w związku z tym przedstawione w rozprawie doktorskiej rozwiązania mogą przyczynić się do poprawy jakości tego rodzaju matryc.

2. Zakres i cel rozprawy doktorskiej

Autor w rozprawie doktorskiej postawił sobie za cel poprawę wydajności przetwarzania danych w hybrydowych pikselowych detektorach promieniowania jonizującego poprzez wykorzystanie koncepcji przetwarzania brzegowego. Taka koncepcja wiąże się z koniecznością zintegrowania z matrycą detektorów odpowiednich obwodów elektronicznych zdolnych do efektywnego wstępnego przetwarzania sygnałów. W pierwszym etapie prac, Autor przeanalizował ważniejsze czynniki wpływające na efektywność implementacji przetwarzania brzegowego. Zostały rozważone różne typy architektury systemów mikroprocesorowych, rodzaje mikroprocesorów oraz uwarunkowania wynikające z budowy dotychczas stosowanych hybrydowych detektorów promieniowania jonizującego opracowanych przez grupę mikroelektroniczną w Katedrze Metrologii i Elektroniki AGH w Krakowie. Biorąc pod uwagę stosowane rozwiązania, Autor doszedł do wniosku, że zintegrowanie mikroprocesora typu RISC z obwodami odczytowymi usprawni działanie sensora, a ponadto stworzy nowe możliwości przetwarzania danych. Autor postawił sobie również za cel opracowanie rozwiązania kompleksowego, które nie tylko usprawnia działanie samego detektora, ale również pozwoli na efektywne, zautomatyzowane testowanie parametrów prototypowych układów scalonych realizujących funkcję detektorów.

W celu osiągnięcia tak postawionych celów autor sformułował trzy główne zadania.

1. Opracowanie scalonego układu odczytowego do hybrydowego pikselowego detektora promieniowania jonizującego, z wbudowanym mikroprocesorem, który rozszerzy możliwości istniejących rozwiązań.
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 oraz pozwoli na weryfikację części cyfrowej projektowanego układu już na wstępnym etapie prac projektowych.

W mojej opinii Autor poprawnie określił zakres swoich prac, a sformułowane zadania pozwoliły na osiągnięcie postawionych celów. Podjęcie w rozprawie doktorskiej tej tematyki i zrealizowanie postawionych zadań miało silne uzasadnienie praktyczne. Dzięki osiągnięciu poprawy części parametrów opracowanych sensorów, prace Autora przyczyniły się do udoskonalenia i rozwoju hybrydowych pikselowych sensorów promieniowania jonizującego.

3. Struktura rozprawy doktorskiej

Rozprawa liczy 83 strony wraz ze wszystkimi wykazami i dodatkami. Przedstawiony materiał został podzielony na 5 głównych rozdziałów. W wykazie literatury zawierającym 65 pozycji, znajdują się 4 pozycje, w których mgr inż. Paweł Skrzypiec jest współautorem. W pierwszym rozdziale przedstawiono zakres tematyczny rozprawy oraz zarys właściwości systemów mikroprocesorowych w kontekście możliwości zastosowania ich w hybrydowych pikselowych detektorach promieniowania jonizującego. Rozdział drugi jest zasadniczym wprowadzeniem do zagadnień związanych z poszukiwaniem optymalnych rozwiązań dostosowanych do rozważanych detektorów. Autor analizuje możliwości udoskonalenia obwodów sterujących i odczytowych sensorów biorąc pod uwagę dostępne architektury systemów mikroprocesorowych oraz różne rodzaje mikroprocesorów. W konkluzji przedstawionej analizy, Autor uzasadnia wybór architektury opartej na mikroprocesorze RISC-V, pozwalającej na definiowanie dodatkowych specyficznych rozszerzeń zbioru instrukcji programowych, które są przydatne do sterowania detektorem. Dzięki tej właściwości staje się możliwe dostosowanie możliwości procesora do specyficznych wymagań narzucanych przez hybrydowe pikselowe detektory promieniowania. W drugiej części tego rozdziału przedstawiane są właściwości hybrydowych detektorów promieniowania opracowanych przez grupę mikroelektroniczną w Katedrze Metrologii i Elektroniki AGH w Krakowie. Przedstawione tam informacje mają zasadnicze znaczenie przy formułowaniu wymagań, które ma spełniać projektowany przez Autora system mikroprocesorowy przeznaczony do współpracy z hybrydowymi pikselowymi detektorami promieniowania. Autor wskazał trzy główne funkcje, które powinien pełnić system mikroprocesorowy, a mianowicie: 1) ustawianie globalnej konfiguracji matrycy pikseli; 2) zapis danych do poszczególnych pikseli; 3) odczyt zawartości poszczególnych pikseli.

Dwa kolejne rozdziały opisują osiągnięcia Autora. Rozdział trzeci dotyczy zaprojektowanego układu scalonego zawierającego matrycę pikseli o rozmiarach 32x8 oraz obwodów realizujących funkcje sterowania, odczytu i zapisu danych. Najważniejszą innowacją zastosowaną w tym prototypowym rozwiązaniu jest zintegrowanie mikroprocesora RISC-V na wspólnym podłożu krzemowym z pozostałymi elementami detektora. Takie rozwiązanie daje dwie zasadnicze korzyści: znacznie skraca czas potrzebny na transfer danych związanych z matrycą pikseli oraz umożliwia wygodną implementację algorytmów wstępnego przetwarzania danych, które pozwalają już na wczesnym etapie poprawić jakość obrazu generowanego przez matrycę. Autor przytacza wyniki analizy działania algorytmów odczytującego i zapisującego dane. Dane pokazują, że w najkorzystniejszym trybie pracy uzyskuje się ponad 96% skrócenie czasu odczytu i zapisu danych. Dzięki przyjętym rozwiązaniom uzyskuje się również skrócenie czasu potrzebnego na przeprowadzenie kalibracji parametrów matrycy. W tym przypadku uzyskano skrócenie czasu kalibracji o ponad 72% w porównaniu do metod bezpośrednich. Tak dobre wyniki świadczą o tym, że przyjęte rozwiązania są efektywne i pozwalają w znaczący sposób poprawić szybkość rejestracji i przetwarzania danych dotyczących promieniowania jonizującego, a co za tym idzie znacząco poprawić ogólną efektywność pracy tego rodzaju detektorów.

W rozdziale czwartym omówiono opracowane przez Autora środowisko do testowania odczytowych układów scalonych. Autor przedstawia zastosowane rozwiązania opierające się na matrycach cyfrowych układów programalnych FPGA oraz na komputerze PC wyposażonym w opracowane przez Autora specjalistyczne oprogramowanie nadzorujące proces testowania i umożliwiające prezentację uzyskiwanych wyników. Czytelnik może zapoznać się z szerokim zakresem testów i pomiarów możliwych do przeprowadzenia za pomocą opracowanego systemu. Na szczególną uwagę zasługuje funkcja pomiaru i kalibracji napięcia niezrównoważenia dyskryminatorów wchodzących w skład torów odczytu danych z pikseli. Wielkość napięcia niezrównoważenia ma bezpośredni wpływ na jednorodność charakterystyk pikseli, a tym samym na jakość obrazu rejestrowanego

promieniowania jonizującego. Opracowany system umożliwia pomiar tych napięć i ich kalibrację dla indywidualnych pikseli w matrycy. Wyniki pomiarów prototypowego układu scalonego pokazują, że matryca pikselowa bez kalibracji wykazuje znaczną rozpiętość wartości napięć, którego odchylenie standardowe wynosi około 12 mV. Zastosowanie procedury kalibracyjnej redukuje tę wielkość do 1,3 mV, a zatem uzyskuje się niemalże 10-krotną zmniejszenie, którego efektem staje się istotna redukcja fałszywych artefaktów w obrazie reprezentującym przestrzenny rozkład promieniowania jonizującego.

W ostatnim piątym rozdziale Autor podsumowuje swoje osiągnięcia zwracając uwagę na szereg prac, które musiał wykonać aby osiągnąć postawione cele. Należy zwrócić uwagę, że praca doktorska mgr inż. Pawła Skrzypca ma charakter projektowy i dotyczy praktycznych rozwiązań zarówno sprzętowych jak i programowych, a zatem wymagała specjalistycznej wiedzy i umiejętności z obu wymienionych dziedzin.

4. Ogólna ocena rozprawy doktorskiej

Autor rozprawy w pełni osiągnął postawione cele wykorzystując zaproponowaną koncepcję implementacji przetwarzania brzegowego. W wyniku przeprowadzonych prac zaprojektował funkcjonujący układ scalony, który pozwolił na praktyczną weryfikację poprawności przyjętych rozwiązań. Przeprowadzone pomiary i testy układu scalonego w sposób nie budzący wątpliwości wykazały, że możliwa jest znacząca poprawa efektywności działania hybrydowych pikselowych detektorów promieniowania jonizującego. Na uznanie zasługuje szeroki zakres wiedzy i umiejętności praktycznych zarówno z zakresu programowania jak i projektowania układów scalonych, które musiał opanować mgr inż. Paweł Skrzypiec aby móc z sukcesem zrealizować postawione cele. Praca doktorska mgr inż. Pawła Skrzypca ma przede wszystkim charakter praktycznego projektu, którego celem było udoskonalenie wcześniejszych rozwiązań detektorów opracowanych przez grupę mikroelektroniczną w Katedrze Metrologii i Elektroniki AGH. Zakres i zadania tej pracy wynikały więc z konkretnych praktycznych potrzeb, które Autorowi udało się skutecznie zaspokoić. Dorobek publikacyjny Autora rozprawy obejmuje 3 referaty prezentowane na międzynarodowych konferencjach oraz artykuł opublikowany w czasopiśmie *Journal of Instrumentation*. Biorąc pod uwagę fakt, że główny wysiłek Autora był skierowany na opracowanie skomplikowanego rozwiązania projektowego, oceniam osiągnięcia publikacyjne jako wystarczające.

5. Uwagi krytyczne

Rozprawa doktorska jest napisana bardzo oszczędnie, w większości zawiera ogólne omówienie zastosowanych koncepcji, uzyskanych wyników, metod testowania i pomiarów. Takie ujęcie zagadnień utrudnia poznanie i zrozumienie innowacyjnych rozwiązań i niuansów odpowiedzialnych za osiągnięcie poprawy parametrów detektora. Praca zyskała by na wartości gdyby pewne jej fragmenty rozwinąć i omówić bardziej szczegółowo. Przykłady takich miejsc w tekście pracy podano poniżej:

1. Na str. 28 jest akapit poświęcony koprocessorowi kontrolera układu odczytowego. Podano tylko ogólny tekstowy opis zasady działania tego układu. W tym miejscu korzystniejszy byłby opis z wykorzystaniem wykresów charakterystycznych sygnałów, ilustrujący, gdzie w kontrolerze i w jakich warunkach zależności czasowe stają się krytyczne powodując błędne działanie tego obwodu.
2. Podobnie, na str. 29 zamieszczono zwięzły opis tekstowy sprzętowych akceleratorów interfejsów danych. Ze względu na duży wpływ tych układów na poprawę szybkości transmisji danych, korzystny byłby bardziej wyczerpujący opis z podaniem szczegółów implementacyjnych.
3. W opisie testów akceleratorów (str. 56-58) znajduje się wyjaśnienie wykrytych problemów związanych z działaniem kontrolera matrycy pikseli. Autor posługuje się wykresami z rys. 4.10 aby

wyjaśnić problem. Moim zdaniem oba wykresy są prawie identyczne i nie pokazują na czym polega istota problemu. Należało by podać bardziej szczegółowe wyjaśnienia.

W pracy znajdują się drobne błędy językowe:

1. str. 10 jest „[...] sposób dostępowania pamięci [...]” – powinno być „[...] sposób dostępu do pamięci [...]”;
2. str. 15 jest „[...] mikroprocesor [...]” – powinno być „[...] mikroprocesor [...]”;
3. str. 16 jest „*Hybrydowe detektory promieniowania jonizującego* są układami elektronicznymi wykorzystywanymi do detekcji i pomiarów parametrów promieniowania, przez które przechodzi.” – powinno być „*Hybrydowe detektory promieniowania jonizującego* są układami elektronicznymi wykorzystywanymi do detekcji i pomiarów parametrów promieniowania przechodzącego przez nie.”;
4. str. 30 jest „[...] podpiętych odpowiednio do interfejsu [...]” – powinno być „[...] podłączonych odpowiednio do interfejsu [...]”;
5. str. 30 jest „[...] operacją był wywołanie [...]” – powinno być „[...] operacją było wywołanie [...]”;
6. str. 37 jest „[...] nie posiadał sprzętowej mnożarki [...]” – powinno być „[...] nie posiadał sprzętowego układu mnożącego [...]” lub „[...] nie posiadał sprzętowego mnożnika [...]”;
7. str. 45 jest „[...] braku rzetelnego połączenia pomiędzy środowiskiem testowym a testowanym układem.” – określenie niejednoznaczne należałoby sprecyzować co Autor ma na myśli;
8. w pracy nadużywane są określenia „dedykowany”, „dedykowanych”, „dedykowanego”, „dedykowanej”, które w języku polski mają raczej znaczenie „poświęcone komuś lub czemuś”; w rozprawie te określenia są używane w znaczeniu „indywidualny”, „specyficzny”, „specjalny” „specjalnie przeznaczony do”.

Niedoskonałości w opisie omawianych w rozprawie zagadnień oraz drobne błędy językowe, w mojej ocenie, nie mają istotnego wpływu na wartość osiągnięć Autora i jakość uzyskanych wyników, w związku z tym rozprawę doktorską oceniam pozytywnie.

6. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Skrzypca pt. „Rozwój scalonych systemów mikroprocesorowych dla hybrydowych detektorów promieniowania jonizującego” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z Ustawą z dnia 20.07.2018, Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnioskuje zatem do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Grzegorz Białkiewicz

