

dr hab. inż. Krzysztof Korcyl
Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
Oddział Fizyki i Astrofizyki Cząstek
Zakład Procesów Dyfrakcyjnych

Kraków, 20.07.2023

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Jurgielewicza
pt. „Rozwój innowacyjnych eksperymentalnych technik badawczych do przeprowadzania
mikrostymulacji i rejestracji aktywności neuronów w mózgu oraz do pomiarów przestrzennego
rozkładu dawki terapeutycznej w radioterapii fotonowej”.

1. Wartość naukowa rozprawy

Rozprawa mgr inż. Pawła Jurgielewicza porusza kwestie rozwoju innowacyjnych technik badawczych dla badań przeprowadzanych w biologii i medycynie. W kontekście pracy innowacyjność tych technik sprowadza się do elektronicznego i komputerowego wspomaganie prowadzenia badań umożliwiającego automatyzację operacji badawczych oraz zwiększenie ich złożoności, choćby w aspekcie wielokanałowości i wielostronności poprzez przygotowanie scenariuszy badań, ich prowadzeniu i automatyzacji analizy wyników. Przedstawiona monografia opisuje aspekty sprzętowe i programowe dla dwóch systemów akwizycji danych – mikrostymulacji i rejestracji aktywności neuronów w mózgu oraz pomiarów przestrzennego depozytu w radioterapii fotonowej. W tych projektach uczestniczyły i uczestniczą wieloosobowe zespoły gdzie Autor przedstawia siebie jako odpowiedzialnego za systemy akwizycji danych. Współczesne systemy akwizycji danych są na tyle skomplikowane że nie ma praktycznie możliwości uruchomienia takiego systemu bez innowacyjnego wkładu pracy autora. Sama integracja takiego systemu wymaga bardzo dobrej znajomości współpracujących komponentów i oryginalność badania opiera się tutaj na stworzeniu unikalnej architektury systemu umożliwiającej efektywną współpracę. W obu projektach Autor przeprowadził badania pokazujące możliwość zbudowania takich systemów w oparciu o skryptowy język programowania Python. Wyzwanie jest tym bardziej ambitne ponieważ powszechna praktyka poparta znaczną liczbą przykładów stanowi, że do realizacji systemów czasu rzeczywistego wykorzystuje się deterministyczne oprogramowanie wykonywane w zdefiniowanych ograniczeniach czasowych. Oryginalność badań potwierdzona jest też pośrednio w rozdziale Podziękowania, z którego wynika, że prace nad powyższymi dwoma systemami były finansowane przez granty Unii Europejskiej, Narodowego Centrum Nauki oraz Funduszu Rozwoju Regionalnego Unii Europejskiej.

Monografia zawiera 4 rozdziały, z których dwa pierwsze i ostatni zbudowane są z dwóch części poświęconych badaniom prowadzonym przez Autora w dwóch systemach: stymulacji i rejestracji aktywności mózgu oraz terapii fotonowej. Dwa pierwsze rozdziały: fizyczne i praktyczne podstawy pomiarów biologicznych oraz architektury sprzętowe systemów pomiarowych nakreślają środowisko wykonywania badań medycznych, metodykę oraz sprzęt wykorzystywany do tych badań.

System stymulacji i monitorowania aktywności mózgu wykorzystuje fizyczne podstawy zjawisk fizykochemicznych zachodzących w trakcie jego fizjologicznej aktywności. Wsparcie sprzętowe w tych badaniach jest oparte o rozwijany na AGH projekt wielokanałowego ASIC Neurostim-3 umożliwiającego równoczesną stymulację i rejestrację aktywności mózgu dla 512 kanałów pracujących z częstotliwością próbkowania do 40 kHz. Do czterech takich układów, wraz z towarzyszącą elektroniką, podłączonych jest do karty zbiorczej, która z kolei poprzez cyfrowy 16-to kanałowy cyfrowy interfejs komunikuje się z komputerem wykonującym program obsługi eksperymentu. Dla poprawnej pracy układu Neurostim-3 konieczny jest ciągły, synchroniczny i niezakłócony dwukierunkowy przepływ sygnałów sterujących oraz odbiór danych. Wymaga to zaprojektowania i wdrożenia nowatorskiego oprogramowania spełniającego wymienione warunki.

Druga część pierwszego rozdziału omawia oddziaływania elektromagnetyczne będące podstawą pomiarów efektów scyntylacyjnych wykorzystywanych do pomiaru dawki promieniowania. Jeśli chodzi o wartość naukową dla badań drugiego systemu – pomiaru rozkładu dawki promieniowania - to podobnie jak w systemie poprzednim konieczne było zaprojektowanie i wdrożenie programu komputerowego zapewniającego bezstratną dwukierunkową transmisję danych z układem scalonym MAROC-3A, będącym podstawowym urządzeniem rejestracji sygnałów 64-ro kanałowego fotopowielacza. Fotopowielacze wraz układem MAROC oraz współpracującym układem FPGA tworzą komponent komunikujący się przez sieć Ethernet. Zaprojektowanie systemu pomiaru przestrzennego rozkładu promieniowania wymaga wykorzystania większej liczby komponentów i budowy nowatorskiego oprogramowania umożliwiającego konfigurację komponentów, synchroniczną współpracę, a następnie rekonstrukcję przestrzenną otrzymanych danych.

Rozdział trzeci zatytułowany Architektura oprogramowania koncentruje się na właściwościach języka programowania Python, który został wybrany, a następnie wykorzystany jako platforma do budowy systemów akwizycji dla wspomnianych wcześniej badań eksperymentalnych. Oryginalność badań opisywanych w tym rozdziale dotyczy prób adaptacji języka Python do pracy wieloprocessorowej i ograniczenia narzutu wymaganego do efektywnego zarządzania pamięcią przy wymianie informacji pomiędzy równoległe wykonywanymi procesami. W przypadku systemu Neurostim-3 poprawne działanie systemu DAQ osiągnięto poprzez uruchomienie procesów interpretera Python komunikujących się poprzez pamięć współdzieloną ale tylko dla deterministycznej pracy systemu czyli dla stymulacji i próbkowania ze stałą częstotliwością - wymiana ramek RTDF o stałej długości. Taka architektura okazała się niewystarczająca dla systemu Dose-3D, gdzie mogą się pojawić asynchronicznie zgłoszenia żądania obsługi z różnych komponentów systemu (MAROC). Poszukując rozwiązania problemów z równoległym przetwarzaniem w Python poprzez mechanizm GIL Autor wprowadził serializację żądań. Okazała się ona jednak wąskim gardłem i dopiero wykorzystanie biblioteki *nogil* pozwoliło zaprojektować i wdrożyć architekturę, która dzięki równoległemu przetwarzaniu pozwoliła osiągnąć wymagane parametry w skalowalnym asynchronicznym systemie DAQ w projekcie Dose-3D.

Monografię zamyka rozdział czwarty poświęcony analizie wyników badań prowadzonych w ramach obu projektów. Większość wyników i omówień dotyczy parametrów uzyskanych dla wielkości definiujących jakość prowadzonych badań, a tylko niewielkie wzmianki przedstawiają analizy wydajności uzyskanych przy badaniu architektury oprogramowania systemów DAQ w obu projektach. Wyniki przeprowadzonych badań, kalibracji itp potwierdzają ich zgodność z oczekiwaniami co pośrednio świadczy o poprawnym zaprojektowaniu systemów akwizycji danych, ich wdrożeniu i przydatności w opisywanych projektach. Zaproponowana i zrealizowana przez Autora architektura oprogramowania pokazuje przydatność platformy Python do systemów czasu rzeczywistego jakimi są systemy akwizycji danych pokazując jednocześnie konieczne modyfikacje w stosunku do referencyjnej dystrybucji.

2. Wartość merytoryczna rozprawy

Monografia prezentuje obszerny opis dwóch projektów opartych o innowacyjne techniki wspomagające badania prowadzone w biologii, medycynie oraz fizyce. Innowacyjność dotyczy tutaj zarówno sprzętu – rozwój nowego układu scalonego w ramach projektu Neurostim-3 oraz wykorzystanie układu MAROC w Dose-3D, jak i oprogramowania – wykorzystanie języka programowania Python do budowy systemu akwizycji danych. Rozdział pierwszy poświęcony jest wprowadzeniu w tematyki obu projektów przytaczając podstawowe procesy biologiczne oraz fizyczne wykorzystywane przy prowadzeniu pomiarów. Analiza tych procesów pozwala na oszacowanie wymagań stawianych przed aparaturą i układami sprzętowymi lecz także na oszacowanie ilości generowanych i transmitowanych danych wyznaczając założenia na przepustowość oprogramowania planowanego do wspomagania prowadzenia takich badań. Opis procesów jest wystarczający do zrozumienia pochodzenia tych założeń.

Rozdział drugi to opis elektroniki czołowej wykorzystywanej w obu projektach - zdecydowanie potrzebny do przedstawienia środowiska w którym będą pracować systemy akwizycji

danych. Sposób realizacji elektroniki czołowej wymusza bowiem architekturę i konstrukcję systemów akwizycji danych począwszy od wielokanałowości poprzez protokoły konfiguracji i transmisji danych. Autor przedstawia tutaj mapowanie sprzętowych komponentów na obiekty programowe, które później będą wykorzystane w budowie architektury całego systemu akwizycji danych. Liczne schematy działania ilustrują w wystarczający sposób zasadnicze cechy tych obiektów.

Rozdział trzeci otwiera opis mechanizmu organizacji pamięci dla języka Python, który staje się główną przyczyną problemów utrudniających wykorzystanie wielowątkowości nowoczesnych procesorów do obsługi wielokanałowych systemów akwizycji danych. Autor w jasny sposób tłumaczy problem, odwołując się do publicznych dyskusji na forum użytkowników języka Python, a następnie pokazuje możliwe rozwiązania powołując się na własny udział w tworzeniu ulepszonych wersji języka. Druga część rozdziału poświęcona jest opisowi architektury oprogramowania zaproponowanej i zrealizowanej przez Autora dla dwóch projektów. Znajdują się tutaj opisy dekompozycji problemów, opis funkcjonalności komponentów, a także ich współpraca w przekazywaniu danych i sterowania. Opisy ilustrowane są czytelnymi schematami ilustrującymi omawiane interfejsy między komponentami.

Dla projektu Neurostim-3 Autor oparł architekturę systemu DAQ o aplikację, która zarządza przebiegiem pomiaru zapewniając synchroniczną transmisję danych (stała długość ramek RTDF). Otrzymane dane deserializuje i udostępnia poprzez protokół IP aplikacjom klientów. Cechą wyróżniającą architekturę systemu DAQ w tym projekcie, w odróżnieniu od klasycznych systemów dokonujących jedynie akwizycji, jest możliwość wysyłania do układu Neurostim-3 sygnałów stymulujących procesy biologiczne. Dla tego projektu Autor dodatkowo zamieszcza informacje dotyczące oprogramowania, poza systemem DAQ, które umożliwia monitorowanie na bieżąco jakości procesowanych danych. Poprzez protokół IP aplikacja klienta na zdalnej maszynie może podglądać dane rejestrowane i upubliczniane przez serwer, a po ich synchronizacji i przetwarzaniu wyświetlać w formie wielokanałowych przebiegów.

Architektura systemu DAQ dla projektu Dose-3D oparta jest o komunikację pomiędzy komponentami o protokół UDP/IP z wykorzystaniem standardu XFCP do ich adresacji. Autor zaproponował tutaj wprowadzenie modułów programowych- jednostek akwizycji - tworzonych przez pary układu MAROC-FPGA dostępnego przez UDP/IP i skojarzonego z nim programowego kontrolera i przypisanie takiej parze osobnego wątku. Oprócz asynchronicznej transmisji danych, generowanych autonomicznie przez FPGA po przekroczeniu progu, jednostka akwizycji jest konfigurowana z wyższego poziomu przed rozpoczęciem pomiaru. Skalowalność takiej architektury może być rozszerzana przez multiplikowanie jednostek akwizycji oraz zwiększanie przepustowości przełącznika sieciowego do wyczerpania przepustowości komputera sterującego obsługującego wielowątkowy system DAQ na bazie języka programowania Python.

Rozdział ostatni, czwarty, jest zatytułowany: badania – wyniki, analiza i omówienie i zawiera wyniki testów wykonanych w rzeczywistym środowisku pomiarowym z wykorzystaniem omawianych systemów DAQ. Dla projektu Neurostim-3 mamy szereg pomiarów wraz z analizą uzyskanych danych pozwalających na oszacowanie parametrów toru analogowego (szumy, wzmocnienie, liniowość itp) ASIC-a, a także wyniki eksperymentów in-vitro, które potwierdzają przydatność systemu do prowadzenia zaplanowanych badań. Pomiary parametrów ASIC pokazały, że układ poprawnie rejestruje sygnały neuronalne pomiędzy 0.3 Hz a 20 kHz i jednocześnie umożliwia stymulację prądową w 64-ech kanałach zaprogramowanym przebiegiem dla amplitud większych od 1.4 μ A. Podobna analiza wyników z pomiarów dotyczących kalibracji sprzętu jest tematem kolejnych stron rozdziału poświęconych projektowi Dose-3D. Podstawowym wynikiem kwalifikującym przydatność systemu do wykonywania pomiarów dawki jest zademonstrowanie proporcjonalności częstotliwości zarejestrowanych zliczeń od mocy dawki promieniowania pierwotnego.

Pierwsze sekcje rozdziału czwartego z omawianych dwóch projektów poświęcone są analizie wydajności systemów DAQ. Analiza prezentowanych wyników badań dla różnych wersji Pythona oraz różnych ustawień systemu operacyjnego pokazuje, że wybór wersji zaproponowany przez Autora umożliwia spełnienie wymagań stawianych przed systemami DAQ w obu projektach.

Merytorycznym zakończeniem pracy jest nienumerowany rozdział - Podsumowanie. Przedstawiając krótko uzyskane wyniki Autor konkluduje, że ich osiągnięcie nie byłoby możliwe bez odpowiednio przygotowanego oprogramowania, którego jest autorem i w związku z tym postawione przed nim cele badawcze zostały spełnione. Rozdział kończy akapit dotyczący możliwości rozwoju,

który w przypadku systemu Neurostim-3 porusza aspekty sprzętowe - poprawa okablowania oraz modyfikacji do ASIC-a, natomiast w przypadku projektu Dose-3D wprowadzenie do systemu znacznika czasu umożliwiającego synchronizację większej liczby układów MAROC, a także rozwój oprogramowania umożliwiającego monitorowanie na bieżąco jakości zbieranych danych.

3. Poprawność redakcyjna rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Jurgielewicz obejmuje 201 stron podzielonych na cztery rozdziały oraz podsumowanie. Monografię kończy 5 dodatków: lista wykorzystanych bibliotek dla systemów Neurostim-3 oraz Dose-3D, dodatek opisujący wkład Autora, a także spisy rysunków i tabel. Dodatki kończy spis skrótów użytych w pracy.

Manuskrypt opisuje działanie dwóch systemów wspomagających prowadzenie badań w biologii i fizyce. Jedyną cechą wspólną w tych projektach jest oparcie budowy systemów akwizycji danych na języku programowania Python i ich realizacji przez Autora. O ile kolejność poruszanej tematyki nie budzi zastrzeżeń – od omówienia biologicznych i fizycznych aspektów prowadzonych badań, poprzez opis uwarunkowań sprzętowych wykorzystywanych w obu projektach, opis architektury systemu DAQ, a kończąc na omawianiu wyników eksperymentów z ich wykorzystaniem, to prowadzenie równoległe narracji dla obu systemów uważam za niekorzystny wybór. Układ pracy w moim przekonaniu byłby bardziej czytelny gdyby każdy z projektów został całościowo omówiony z wyszczególnieniem wymagań stawianych przed systemami DAQ, zaproponowaną architekturą i implementacją systemu oraz krótką analizą wyników. Rozdział omawiający przeprowadzone badania oraz analizę wyników mógłby być skrócony do badań dotyczących architektury DAQ oraz paru przykładów pokazujących przydatność zaimplementowanego systemu.

Styl narracji jest jasny, zrozumiały i zwięzły. Rysunki oraz diagramy są czytelne oraz dobrze ilustrują prezentowane zagadnienie – duża zasługa w obszernych i czytelnych podpisach.

4. Uwagi krytyczne

Praca imponuje liczbą poruszanych zagadnień w dwóch rozłącznych projektach i w pewnych przypadkach nie jest jasne w jakim celu dany aspekt jest omawiany. Po przedstawieniu środowiska badań oraz dostępnej realizacji sprzętowej brakuje nawiązania do wymagań stawianych przed systemami DAQ. W miejsce typowej rozprawy doktorskiej przedstawiającej konkretny problem, podejście doktoranta do tego problemu i uzyskane przez niego wyniki mamy monografię, a w zasadzie dwie monografie omawiające zagadnienia automatyzacji technik badawczych w dziedzinie biologii oraz fizyki. W ostatnim rozdziale zatytułowanym podsumowanie znajduje się stwierdzenie, że zadania badawcze postawione przed Autorem zostały zrealizowane. Wynika ono pośrednio z wcześniejszego, skrótowego podsumowania podstawowych wyników osiągniętych w pracy omawianych systemów co byłoby niemożliwe bez sprawnie działających systemów DAQ, za których przygotowanie i wdrożenie odpowiedzialny był Autor. Brakuje jasno postawionej tezy na początku monografii.

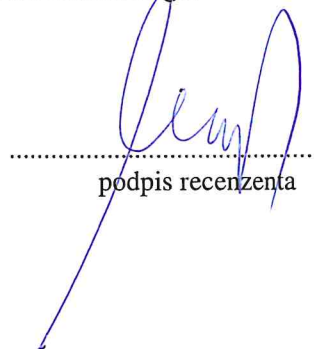
5. Ocena końcowa:

Praca zawiera opis realizacji dwóch projektów wykorzystujących nowoczesne techniki badawcze do prowadzenia eksperymentów – jednego w biologii przy badaniach aktywności neuronów w mózgu oraz drugiego służącego ocenie przestrzennego rozkładu wiązki fotonowej w terapiach onkologicznych. W obu przypadkach techniki te oparte są o wykorzystanie wielokanałowego sprzętu elektronicznego wspieranego systemem akwizycji danych, który jest dziełem Autora. Zaprojektowanie i uruchomienie tych systemów wymagało od Autora poznania i zrozumienia działania wykorzystywanego sprzętu (Neurostim-3 oraz MAROC 3A) jak również zrozumienia badanych procesów w celu przeprowadzenia analizy wyników, które mogły potwierdzić poprawność działania całych systemów. Autor wykonał tę pracę w sposób zadowalający – systemy działają i będą rozwijane.

Przytoczone i szczegółowo omówione wyniki różnorodnych eksperymentów wykonanych z wykorzystaniem tych systemów dowodzą, że Autor posiadał wystarczającą wiedzę do prowadzenia samodzielnie badań naukowych.

Liczne odnośniki w pracy do bogatej literatury załączone do pracy potwierdzają szeroką wiedzę Autora w tematach związanych z prowadzonymi badaniami. O ważności poruszanej tematyki świadczy ponadto załączona lista współautorstwa Autora w artykułach publikowanych w wysoko punktowanych czasopismach naukowych, a także udział Autora w szeregu międzynarodowych konferencji gdzie omawiane systemy były prezentowane.

Uważam, że praca mgr inż. Pawła Jurgielewicza spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



.....
podpis recenzenta

