

Dr hab. Jacek Rzakiewicz, prof. NCBJ
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła Linczuka „Szybka platforma dystrybucji strumieni danych pomiarowych dla detektora GEM do diagnostyki zanieczyszczeń plazmy tokamakowej”.

Rozprawa doktorska mgra inż. Pawła Linczuka „Szybka platforma dystrybucji strumieni danych pomiarowych dla detektora GEM do diagnostyki zanieczyszczeń plazmy tokamakowej” została przygotowana na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych pod kierunkiem promotora prof. dra hab. inż. Krzysztofa Poźniaka oraz promotora pomocniczego dr hab. Maryny Chernyshovej. Rozprawa ma formę opracowania liczącego 213 stron podzielonego na dziesięć rozdziałów wraz z podsumowaniem. Ponadto opracowanie zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim, indeks używanych w pracy skrótów oraz wyczerpujący spis literatury zawierający odniesienia do 325 pozycji bibliografii. Praca uzupełniona jest trzema załącznikami z pseudokodami odpowiednich algorytmów oraz implementacją metody analizy czasu i jakości przetwarzania.

Rozprawa doktorska rozpoczyna się od wprowadzenia, w którym doktorant wskazuje tokamaki, jako urządzenia, które realizując magnetyczne uwięzienie wysokotemperaturowej plazmy, mogą umożliwić praktyczną realizację kontrolowanej syntezy jądrowej i w ten sposób przyczynić się do uniezależnienia produkcji energii elektrycznej od źródeł kopalnych. Następnie mgr inż. Paweł Linczuk w sposób przekonujący przedstawia motywację do rozwoju metod diagnostyki plazmy tokamakowej, w tym diagnostyki tzw. miękkiego promieniowania rentgenowskiego, która może istotnie przyczynić się do utrzymania stabilnej plazmy z parametrami zapewniającymi efektywną produkcję energii. We wprowadzeniu podkreślono także, że poprawne działanie diagnostyki miękkiego promieniowania rentgenowskiego wymaga zapewnienia wysokiej jakości zbieranych danych, m.in. poprzez wykrywanie i eliminację błędów rejestrowanych danych pomiarowych.

Po przedstawieniu struktury pracy w rozdziale drugim, w kolejnym rozdziale autor omawia zagrożenia związane z wykorzystaniem paliw kopalnych do wytwarzania energii, alternatywne źródła energii obecnie stosowane oraz kierunki rozwoju, dzięki którym możliwe będzie zastąpienie paliw kopalnych w energetyce.

W rozdziale czwartym mgr inż. Linczuk przedstawia zagadnienia związane z kontrolowaną syntezą termojądrową w kontekście możliwości produkcji energii. W początkowej części rozdziału doktorant porównuje koncepcje magnetycznego i inercyjnego utrzymania plazmy wysokotemperaturowej. Wskazuje następnie główne infrastruktury badawcze realizujące eksperymentalnie koncepcję magnetycznego utrzymania plazmy, przedstawia dotychczasowe postępy w uzyskaniu ilości energii w tokamakach oraz europejskie plany rozwoju fuzji termojądrowej. W kolejnej części rozdziału doktorant przedstawia generalną koncepcję tokamaka oraz system kontroli, zarządzania i diagnostyki. W szczególności omówiona została diagnostyka miękkiego promieniowania rentgenowskiego (SXR), która pozwala na sprawne monitorowanie zanieczyszczeń powstających w plazmie i przez to wspieranie procesu utrzymania kontrolowanej syntezy termojądrowej. Doktorant omawia diagnostykę SXR na przykładzie systemu diagnostycznego wykorzystującego detektor typu GEM rozwijanego dla tokamaka WEST przez zespół Politechniki Warszawskiej (PW), którego doktorant jest członkiem. W dalszej części rozdziału doktorant omawia pierwszą generację systemu akwizycji danych zaimplementowanego przez zespół PW w wysokorozdzielczej diagnostyce rentgenowskiej na tokamaku JET. Wskazane zostały istotne ograniczenia tego systemu akwizycji, co w sposób bezpośredni zdefiniowało potrzebę ulepszenia systemu. Nowy system, omawiany w niniejszej pracy składa się z detektora GEM, kart analogowych (AFE), płyt konwersji sygnału analogowego do cyfrowego (ADB), płyt

zawierających układ FPGA oraz dedykowanego koncentratora PCIe. Układ taki pozwala na próbkowanie impulsów ładunkowych trwających typowo 240 ns z detektora GEM z częstotliwością 80 MHz. W tym miejscu wskazane byłoby dodanie informacji o zmienności (rozkładzie statystycznym) czasów trwania impulsów ładunkowych i wskazanie na kryteria, które zdecydowały o próbkowaniu z częstotliwością 80 MHz. W dalszej części rozdziału doktorant omówił kluczowe aspekty szybkiej akwizycji dużych strumieni danych diagnostyki SXR i wskazał na konieczność przetwarzania sygnałów w czasie rzeczywistym. Po zdefiniowaniu wymagań systemu akwizycji danych dla diagnostyki SXR, mgr inż. Linczuk przedstawił przegląd dostępnych rozwiązań platform przetwarzania danych w kontekście możliwości implementacji w systemach diagnostyki plazmy tokamakowej. Rozdział kończy się przedstawieniem genezy pracy, w której autor stwierdza, że nie jest dostępna gotowa platforma oprogramowania dla systemów pomiarowych czasu rzeczywistego diagnostyki SXR dedykowanych do pracy w pętli sprzężenia zwrotnego z układem sterowania tokamakiem. Warto w tym miejscu podkreślić, że analiza literaturowa przedstawiona w rozdziale czwartym niniejszej rozprawy została opublikowana w skróconej formie w publikacji, w której doktorant jest pierwszym autorem, co należy uznać za jedno z istotnych osiągnięć naukowych doktoranta.

Rozdział piąty zawiera tezę i cele naukowe przedłożonej rozprawy doktorskiej. W rozdziale tym doktorant wskazuje, że w kontekście zapewnienia pracy układu akwizycji danych diagnostyki SXR w pętli sprzężenia zwrotnego istnieje konieczność przetwarzania danych pomiarowych wielkich rozmiarów z latencją rzędu kilku milisekund. Następnie doktorant formułuje hipotezę swojej pracy doktorskiej stwierdzając, że „Możliwe jest opracowanie wielokanałowej, niskolatencyjnej platformy dystrybucji oraz kontekstowego i strumieniowego przetwarzania pakietów danych pomiarowych wielkich rozmiarów z detektora GEM, służących do monitorowania zanieczyszczeń gorącej plazmy, dla systemu sterowania tokamakiem WEST pracującego w pętli sprzężenia zwrotnego (...)”. W rozdziale w sposób jasny zdefiniowane są również cele pracy dotyczące opracowania modelu systemu platformy, wyznaczenia maksymalnych przepustowości różnych wariantów konfiguracji systemu oraz opracowania i weryfikacji implementacji zaproponowanego modelu platformy w systemie diagnostyki gorącej plazmy tokamakowej z wykorzystaniem detektora GEM dla tokamaka WEST.

Rozdział szósty rozpoczyna się od przedstawienia kluczowych cech funkcjonalnych, jakościowych oraz rozwojowych tworzonej przez doktoranta platformy dystrybucji i przetwarzania danych rejestrowanych przez diagnostykę SXR. W kolejnej części doktorant omawia schemat kanałów komunikacyjnych pomiędzy różnymi elementami platformy oraz schemat logiczny przepływu danych. W dalszej części rozdziału omówiona została metodyka procesu optymalizacji budowy platformy, w tym optymalizacja systemu operacyjnego oraz metody optymalizacji oprogramowania. W końcowej części rozdziału przedstawiono metody i strategie przetwarzania i monitoringu danych w ramach platformy, w celu zachowania wysokiej jakości danych pomiarowych oraz przeprowadzenia analiz: czasowej i stabilności przetwarzania danych. Warto w tym miejscu podkreślić, że zaproponowany model platformy pozwolił na migrację obliczeń z systemów akwizycji danych wykorzystujących układy FPGA i ASIC do systemów komputerowych integrujących dodatkowo procesory oraz inne urządzenia obliczeniowe, takie jak GPGPU oraz tzw. akceleratory obliczeń. Niniejsza innowacja wydaje się być kluczowa w kontekście spełnienia wymagań pracy systemów pomiarowych czasu rzeczywistego dedykowanych do pracy w pętli sprzężenia zwrotnego układu sterowania tokamakiem i dlatego należy ją uznać, jako ważne osiągnięcie naukowe przedstawione w niniejszej rozprawie.

W rozdziale siódmym doktorant omawia implementację modelu dla systemu pomiarowego pracującego w czasie rzeczywistym dedykowanego do diagnostyki SXR na tokamaku WEST. W początkowej części rozdziału mgr inż. Linczuk opisuje elementy funkcyjne wraz z kanałami komunikacji umieszczone na płycie głównej systemu pomiarowego oraz konfigurację interfejsu pomiędzy systemem operacyjnym, a płytą główną systemu komputerowego (UEFI). W kolejnej części rozdziału opisano algorytm wypracowania histogramów: ładunkowego, pozycyjnego i czasowego, na podstawie danych pomiarowych diagnostyki SXR oraz autorskie implementacje

metod analizy wprowadzanego opóźnienia i wydajności systemu. Należy podkreślić zaimplementowanie przez doktoranta precyzyjnej metody pozyskiwania aktualnej wartości czasu dla budowanej platformy dystrybucji danych niezależnego od tzw. stanu synchronizacji systemowej. Pozwoliło to uzyskać średni czas trwania pomiaru czasu w ok. 50 ns, dla wartości odchylenia standardowego do 100 ns dla przeprowadzonych, na jądrze Linux (wersja 2.6.32) testów. Ponadto w rozdziale omówiono skonstruowanie acyklicznego grafu skierowanego przetwarzania strumieni danych w ramach opracowywanej platformy, implementację klas realizujących etapy przetwarzania w acyklicznym grafie skierowanym platformy, implementację środowiska uruchomieniowego oraz skryptów umożliwiających analizę i prezentację wyników.

W rozdziale ósmym mgr inż. Linczuk omawia przeprowadzone przez siebie badania na laboratoryjnym stanowisku technicznym służącym do weryfikacji implementacji platformy pod kątem wydajności, przepustowości i opóźnienia na poszczególnych etapach przetwarzania danych oraz na laboratoryjnym stanowisku eksperymentalnym służącym do weryfikacji jakości pomiarów fizycznych wyposażonym w niskoenergetyczne źródło promieniowania rentgenowskiego. Testy wykonane na laboratoryjnym stanowisku technicznym pozwoliły na wyznaczenie czasu martwego dla stanu saturacji, czyli stanu, w którym system pomiarowy osiąga pełne nasycenie wewnętrznych kolejek danych po stronie układu FPGA oraz maksymalną przepustowość transmisji danych. Analizy jakości porównujące algorytm zaimplementowany w opracowanej przez doktoranta platformie z kodem referencyjnym w MATLAB potwierdziły możliwość zastosowania algorytmu w przetwarzaniu w czasie rzeczywistym danych eksperymentalnych rejestrowanych przez diagnostykę SXR na tokamaku WEST. W kolejnej części rozdziału doktorant omówił budowę laboratoryjnego stanowiska eksperymentalnego zlokalizowanego w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie. Stanowisko oprócz elektroniki pomiarowej wyposażone było w detektor typu GEM oraz w niskoenergetyczne źródło promieniowania rentgenowskiego. Zgodnie z wymaganiami diagnostyki SXR na tokamaku WEST, przy użyciu lampy rentgenowskiej przeprowadzono testy układu detekcyjnego przy zadanym strumieniu promieniowania rentgenowskiego o natężeniu 3 MHz zliczeń klastrow znormalizowanych na 64 kanały dla krótkich cykli pomiarowych do kilkadziesiąt sekund i 1 MHz zliczeń dla długich cykli pomiarowych do kilku minut. Na podstawie badań przeprowadzonych dla trybu nadążnej detekcji klastrow wraz z archiwizacją źródłowych danych pomiarowych wyznaczono obciążenie laboratoryjnego systemu eksperymentalnego przy intensywności 1 MHz i 3 MHz klastrow znormalizowanych oraz odpowiednie obciążenia poszczególnych węzłów przetwarzania danych. Testy uzupełniono badaniami weryfikacyjnymi z wykorzystaniem modułu symulacyjnego, dzięki czemu możliwe stało się porównanie symulacji z rzeczywistymi pomiarami. W ten sposób doktorant potwierdził stabilną pracę tworzonej platformy dystrybucji danych zarówno w procesach krótko- jak i długookresowych służących do nadążnego tworzenia histogramów zanieczyszczeń plazmy na tokamaku WEST.

Rozdział dziewiąty poświęcony został omówieniu integracji platformy dystrybucji danych rejestrowanych przez diagnostykę SXR z systemami sterującymi tokamaka WEST. W początkowej części rozdziału doktorant przedstawił schemat instalacji systemu pomiarowego na tokamaku WEST oraz omówił proces sterowania systemem diagnostycznym SXR z poziomu eksperymentu WEST. W kolejnej części rozdziału zaprezentowano przykładowe pomiary kwantów promieniowania rentgenowskiego rejestrowane z odpowiednią rozdzielczością przestrzenną, czasową i energetyczną przez układ detekcyjny wyposażony w detektor GEM oraz platformę dystrybucji danych. Taka rejestracja danych pozwala na wysokorozdzielcze czasowe i przestrzenne analizy procesów radiacyjnych zachodzących w plazmie tokamaka WEST oraz na odpowiednie analizy transportu zanieczyszczeń. Warto w tym miejscu podkreślić, że praca doktoranta związana z integracją platformy dystrybucji danych z systemami sterującymi tokamaka WEST przyczyniła się w sposób istotny do kilku publikacji w renomowanych czasopismach naukowych, takich jak 'Journal of Instrumentation', 'Nuclear Materials and Energy' i 'Review of Scientific Instruments'. W końcowej części porównano wyniki pomiarów rejestrowane przez różne diagnostyki w wyładowaniach plazmowych nr 55166 oraz 54981 na tokamaku WEST. Prosiłbym w tym miejscu o przedstawienie nieco więcej szczegółów dotyczących sygnałów SXR (panele SXR rys. 61), w

szczegółności, co oznaczają różne kolory linii na wykresach przedstawiających wyniki diagnostyki SXR, dlaczego mierzona moc promieniowania SXR jest o rząd wielkości większa dla wyładowania nr 54981 niż dla wyładowania plazmowego nr 55166 mimo, że suma sygnałów z detektora GEM (dolne panel rys. 61) różni się co najwyżej o czynnik kilka.

Jeżeli chodzi o część edytorską, należy stwierdzić, że praca przygotowana jest bardzo starannie, włącznie z przedstawionymi w pracy pozycjami bibliograficznymi, skrótami, schematami i rysunkami. Wskazując pewne niedoskonałości edytorskie należy stwierdzić, że niektóre określenia powinny być używane nieco bardziej precyzyjnie, np. określenie „Reprezentatywne” w zdaniu „Reprezentatywne urządzenie realizujące metodę inercyjną (...)” w paragrafie 4.1 należałoby raczej zastąpić określeniem „przykładowe” lub „unikatowe”. W rozdziale 7.7 określenie „zanieczyszczenia plazmy na sekundę” należałoby zastąpić określeniem „ewolucja czasowa poziomu zanieczyszczenia plazmy z rozdzielczością sekundową”. Inną niedoskonałością pracy jest przedstawianie niektórych rysunków w sposób nie do końca czytelny czy też w sposób zbyt „techniczny”. Np. rysunek 21 zawiera dane opisowe (indeks: BS-240531-Fe-4 oraz ramka opisowa z parametrami Pomiar, Wzmoc. itd.), które powinny być albo wyjaśnione albo usunięte z rysunku. Opis niniejszego rysunku powinien być również nieco bardziej precyzyjny. Fragment opisu „dla pomiaru ^{55}Fe ” należałoby doprecyzować np. określeniem „dla pomiaru przeprowadzonego przy użyciu źródła izotopowego ^{55}Fe ”.

Powyższe uwagi nie mają zasadniczego wpływu na zdecydowanie pozytywną ocenę pracy doktorskiej mgr inż. Linczuka. Autor przedłożonej rozprawy z sukcesem podjął zagadnienie naukowo-badawcze dotyczące modelowania, implementacji i wdrożenia zaawansowanych rozwiązań sprzętowo-programowych przeznaczonych do diagnostyki zanieczyszczeń plazmy w tokamakach. W rozprawie przeprowadzono w sposób pogłębiony studia literaturowe oraz analizę źródeł, w szczególności analizę dostępnych rozwiązań platform przetwarzania danych w kontekście możliwości implementacji w systemach diagnostyki plazmy. Należy stwierdzić, że wszystkie zdefiniowane cele pracy zostały zrealizowane dla uzasadnionych założeń oraz przy zastosowaniu właściwej metodologii. Należy również podkreślić oryginalność opracowanej platformy przetwarzania danych diagnostyki SXR w trybie czasu rzeczywistego. Zgodnie z moją najlepszą wiedzą nie istnieją podobne rozwiązania o przedstawionych parametrach zintegrowane z systemem sterowania tokamaka. Co więcej, niniejsze rozwiązanie ma potencjał do dalszego rozwoju w obszarze metod diagnostyki plazmy tokamakowej, jak również w innych obszarach technicznych, w których wymagane jest przetwarzanie danych pomiarowych wielkich rozmiarów w czasie rzeczywistym. Doktorant potwierdził również umiejętność poprawnego i zwięzłego prezentowania wyników swoich analiz, czego dowodem jest zarówno niniejsza rozprawa jak również liczne publikacje naukowe (współautor 47 publikacji, w tym 20 z listy filadelfijskiej a 10 jest głównym autorem).

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa przedłożona przez mgr inż. Pawła Linczuka spełnia wymagania zarówno zwyczajowe, jak i formalne stawiane rozprawom doktorskim z wyraźnym nadmiarem i dlatego wnioskuje o jej wyróżnienie.



Jacek Rzakiewicz