

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Warszawa, 2 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 16 października 2018 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

Mgr. inż. Rafała Krawczyka

temat: „HPC/HTC based low-latency data processing for impurities in tokamak plasma diagnostics”

promotor – prof. dr hab. inż. Ryszard Romaniuk z Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej

recenzenci:

prof. dr hab. Piotr Bała z Interdyscyplinarnego Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego,
dr hab. inż. Roman Deniziak, prof. Politechniki Świętokrzyskiej, Katedra Systemów Informatycznych

Obrona odbędzie się w dniu 16 października 2018 r. w sali 116 na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych – Gmach im. Janusza Groszkowskiego, Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19; początek godz. 16.00.

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

WARSAW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electronics and Information Technology

Ph.D. THESIS

Rafał Dominik Krawczyk
M.Sc. Eng.

HPC/HTC based low-latency data processing for
impurities in tokamak plasma diagnostics

Supervisor
Prof. Ryszard Romaniuk

Warsaw, 2018

STRESZCZENIE

Tematyka pracy dotyczy rozwoju szybkich systemów pomiarowych czasu rzeczywistego do diagnostyki gorącej plazmy tokamakowej dla konstruowanego reaktora termojądrowego ITER. Głównym celem badawczym było opracowanie szybkiego sposobu przetwarzania danych wielkich rozmiarów w heterogenicznym systemie diagnostyki zanieczyszczeń gorącej plazmy tokamakowej. Na podstawie analizy pokrewnych zagadnień w dziedzinie fizyki plazmy i fizyki wysokich energii wykazano, że przedstawiony problem badawczy jest jakościowo nowy i wymaga autorskiego podejścia. Opracowano w tym celu model oraz metodykę rozwoju szybkiego programowego przetwarzania z wykorzystaniem serwerów do analizy danych pomiarowych pozyskiwanych z detektora GEM za pośrednictwem szybkiego systemu pomiarowego bazującego na układach FPGA. Celem było sformułowanie systematycznego podejścia w integracji rozwiązań typowych w przetwarzaniu równoległym i systemach wbudowanych aby umożliwić rozwój heterogenicznego instrumentarium dla eksperymentów fizycznych wielkiej skali oraz zapewnić efektywną dekompozycję przetwarzania w tego typu urządzeniach. Omówiono opracowanie skalowalnej programowej platformy obliczeniowej z wykorzystaniem wysokowydajnych serwerów i akceleratorów obliczeń umożliwiających szybkie przetwarzanie danych wielkich rozmiarów z wysoką przepływnością i niską latencją. Autorskie rozwiązania wykorzystano w implementacji systemu dla tokamaka testowego WEST w ośrodku badawczym Cadarache. W pracy omówiono opracowane szybkie algorytmy diagnostyczne zanieczyszczeń plazmy w wersjach zarówno sekwencyjnych jak i równoległych. Zostały one zaimplementowane z wykorzystaniem przedstawionych w pracy metod optymalizacyjnych, tym sposobem łącząc dziedziny elektroniki, fizyki oraz informatyki w ramach systematycznej metodologii badawczej. Omówiono najważniejsze techniki i wzorce przetwarzania równoległego, które umożliwiły znaczne przyspieszenie przetwarzania. Zaprezentowano silnik obliczeniowy z serwerem, w którym zaadaptowano algorytmy do pracy ciągłej. Zbadano rozwiązanie pod względem wydajnościowym oraz wykazano że zaproponowane w pracy podejście zapewnia skalowalne rozwiązanie dla instrumentarium dedykowanego eksperymentom fizycznym wielkiej skali.

Słowa kluczowe: Detektory GEM, Fizyka plazmy, systemy czasu rzeczywistego, programowanie równoległe, obliczenia heterogeniczne.

ABSTRACT

The topic of the thesis concerns the development of high-throughput and real-time scientific instruments for the constructed ITER tokamak. The research was undertaken to provide a scalable, software-defined computational platform with high-performance computing servers and accelerators. The purpose was to provide a fast, high-throughput real-time processing of large volumes of data fed by the electronic front-end with FPGAs and the GEM detector, used in the heterogeneous plasma impurities diagnostic system in magnetic confinement fusion physics. In the analysis of the related research in tokamak plasma diagnostics and the High Energy Physics, it was demonstrated that the presented issue is qualitatively new and requires an authorial solution. Therefore, the model and the method of development were established for the server-based processing of signals from the GEM detector, preprocessed by the front-end with FPGAs. The purpose was to establish a systematic approach to the integration of methods from high-performance computing with electronic systems, in order to provide heterogeneous instruments for large-scale physics experiments. Additional issue solved within the research was the efficient workload decomposition for such devices. A base of knowledge was prepared concerning the design of fast software-defined processing with contemporary hardware and software platforms. The authorial methodology was subsequently utilized in the implementation of the system server-based back-end for the WEST tokamak in the Cadarache research facility. The plasma diagnostic processing was successfully accelerated with the new authorial optimized algorithms, both in the sequential and the parallel variants. They were developed with the optimization methods adopted from the fields of physics, electronics, and computer science, discussed in the thesis. The most relevant techniques and parallel patterns were presented. Their application and resulting acceleration of computations were discussed. The stand-alone processing platform was implemented that incorporated the fast analysis. The solution was evaluated in terms of performance. It was proven that the real-time processing with a scalable system can be achieved in the development of advanced instruments for the large-scale physics experiments.

Keywords: GEM detectors, magnetic confinement fusion, real-time systems, high-performance computing, heterogeneous computing

Acknowledgements

This work has been conducted within the framework of the EUROfusion Consortium and a Horizon 2020 grant. It was partly supported by Polish Ministry of Science and Higher Education and the Warsaw University of Technology.

I would like to solemnly thank my supervisor – Prof. Ryszard Romaniuk and my tutor and project advisor – Prof. Krzysztof Pozniak, for the support in writing this thesis.

I wish to express my gratitude to Ph.D. Maryna Chernyshova, Ph.D. Tomasz Czarski, Ph.D. Karol Malinowski and Ph.D. Ewa Kowalska-Strzęciwilk from Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion, for the support of research in this thesis in the fields of physics and metrology.

I would like to mention my colleagues from Warsaw University of Technology- Paweł Linczuk, Andrzej Wojeński, Piotr Kolasiński, Grzegorz Kasprowicz, Michał Gaska and Wojciech Zabołotny, whose research was strongly interwoven with my work.

I also wish to thank Ph.D. Didier Mason, Ph.D. Axel Jardin, Ph.D. Didier Vezinet, Philippe Malard from the Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique of the French Alternative Energies and Atomic Energy Commission, for their help and the opportunities of work in unique fields of plasma confinement science.

Furthermore, I express my gratitude to Ph.D. Sébastien Valat and Ph.D. Niko Neufeld from the LHCb team of CERN, with whom I learned to develop large-scale HPC and HTC systems for High Energy Physics and who helped me to I acquire engineering knowledge used in my studies.

Prof. dr hab. Piotr Bała
Interdyscyplinarne Centrum Modelowania
Matematycznego i Komputerowego
Uniwersytet Warszawski
bala@icm.edu.pl

Toruń, 16 lipca 2018

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ RAFAŁA DOMINIKA KRAWCZYKA DLA
RADY WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Tytuł rozprawy: HPC/HTC Based Low-Latency Data Processing for Impurities in Tokamak Plasma Diagnostics

Autor rozprawy: mgr inż. Rafał Dominik Krawczyk

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrywane w pracy (teza rozprawy) i czy zostało one dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Dominika Krawczyka napisana jest w języku angielskim i dotyczy rozwoju systemu przetwarzania danych w systemie diagnostyki plazmy w urządzeniu TOKAMAK. Podstawowym celem jest stworzenie systemu (sprzętowego i programistycznego) charakteryzującego się niskimi opóźnieniami przetwarzania danych (niską latencją) i wysoką wydajnością (high throughput). Szczegółowym celem autora było wykazanie, że możliwe jest stworzenie takiego systemu w oparciu o przetwarzania danych wykonywane w zasadniczej części za pomocą typowych procesorów zamiast wykorzystywanych do tej pory układów opartych o karty FPGA. Cel pracy został przez autora jasno sprecyzowany na stronie 41 rozprawy (Rozdział 3.3).

Praca ma charakter informatyczny i dotyczy zaprojektowania systemu, budowy prototypowego systemu, stworzenia oprogramowania i jego doświadczalnego przetestowania. Rozprawa liczy 161 stron i jest podzielona na 8 rozdziałów uzupełnionych streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz listą skrótów. Rozdziały 1 i 2 zawierają wprowadzenie do tematu, opis systemów wytwarzania plazmy i detekcji jej parametrów. W rozdziale 3. przedstawiono cele pracy. Rozdział 4 i 5 zawierają opis modelu przetwarzania danych oraz specyfikę wielkoskalowego przetwarzania danych (HPC i HTC). Rozdziały 6 i 7 (strony 86-144) zawierają opis prac wykonanych przez autora oraz wyniki testów. Podsumowanie stanowi rozdział 8.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy 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?

Początkowe rozdziały pracy zawierają wprowadzenie do tematyki związane z pracą i koncentrują się na opisie systemów generacji plazmy i problemów związanych z detekcją stanu plazmy. Rozdziały te przedstawiają aktualny stan wiedzy w zakresie pomiaru parametrów pracy systemu oraz wyzwań związanych ze zbieraniem danych i ich przetwarzaniem. Ta część rozprawy jest napisana w sposób jasny i przekonujący, jest podbudowana licznymi odnośnikami do literatury. Zagadnienie jest szerokie, ale autor

rozprawy wyważył opis przedstawiają informacje ogólne i koncentrując się na kwestiach istotnych dla rozprawy.

Pewien niedosyt pojawia się przy opisie technologii zrównoleglania aplikacji, które są opisane z szerokim wykorzystaniem materiałów firmy Intel, przez co zagadnienia te są przedstawione dość subiektywnie i minimalizują znaczenie innych, także bardziej ogólnych rozwiązań. Jest to najprawdopodobniej konsekwencja samodzielnego zapoznawania się z tą tematyką programowania równoległego.

Bibliografia zamieszczona w rozprawie jest rozbudowana i obejmuje 178 pozycji, aczkolwiek część z nich to odnośniki do stron internetowych. Literatura dobrana jest poprawnie i nie budzi zastrzeżeń.

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

Postawione w rozdziale 3. zagadnienia zostały przez autora rozwiązane. W rozprawie przedstawiono doświadczone dane pokazujące zasadność dokonywania znaczącej części analizy danych w oparciu o procesory ogólnego przeznaczenia w miejsce stosowanych dotychczas układów FPGA. Użyte do tego celu metody i założenia (w tym projekt systemu) są poprawne i uzasadnione. Autor przedstawił dane eksperymentalne świadczące o tym, że przygotowane rozwiązanie charakteryzuje się odpowiednio niską latencją i odpowiednio wysoką szybkością przetwarzania danych.

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 polega na zaprojektowaniu i zbudowaniu nowego systemu informatycznego zbierającego i analizującego dane pomiarowe w systemie detekcji stanu plazmy. Dotychczas stosowane rozwiązanie oparte przede wszystkim na układach programowalnych FPGA zostało zmodyfikowane tak, by większa część analizy danych odbywała się z wykorzystaniem procesorów CPU oraz kodów zaimplementowanych w języku C (zamiast stosowanych wcześniej kart FPGA czy skryptów Matlab).

Jak rozumiem oryginalny wkład autora polega przede wszystkim na przeniesieniu kodów napisanych jako skrypty Matlab do C oraz przetestowania ich wydajności i poprawności (choć w rozprawie na temat poprawności kodów nie ma informacji – zakładam że autor uznał to za oczywiste). Implementacja z wykorzystaniem języka C okazała się być kilka – kilkanaście razy szybsza. Uzyskany wynik był spodziewany: niska wydajność Matlab'a w porównaniu z implementacją w C/C++ jest dobrze znana.

Drugi istotny wkład autora to dokonanie zrównoleglenia procesu przetwarzania danych. W tym celu zostały wykorzystane standardowe narzędzia programistyczne, przede wszystkim kompilator Intela wspierający paradygmat OpenMP oraz zrównoleglenie w modelu fork-join. Algorytm analizy danych nie był specjalnie trudny do zrównoleglenia, w zasadzie przetwarzanie fragmentów danych odbywa się niezależnie. Jedyne problemy dotyczą zbudowania wynikowego histogramu, co z kolei jest w miarę standardową operacją redukcji. Uzyskanie przez autora skalowalności do kilkunastu rdzeni obliczeniowych nie jest w tym

przypadku szczególnie trudne. Z informatycznego punktu widzenia oba osiągnięcia nie są specjalnie wyjątkowe.

W miarę oryginalnym pomysłem była zmiana sposobu składowania danych w pamięci – zamiast stosowanego dotychczas zbioru poszczególnych pomiarów zastosowano tablicę zawierającą ustaloną liczbę pomiarów. Pozwoliło to na łatwiejsze zrównoleglenie aplikacji z wykorzystaniem pamięci współdzielonej. Prawdę powiedziawszy, większym wyzwaniem byłoby pozostawienie dotychczasowej reprezentacji danych dostosowanej do przetwarzania strumieniowego. Wymagałoby to jednak zmiany sposobu zrównoleglenia analizy danych.

Kolejnym, i chyba najistotniejszym osiągnięciem jest zaprojektowanie nowego systemu do analizy danych pomiarowych i wykorzystanie do tego celu w większym stopniu niż dotychczas procesorów ogólnego przeznaczenia. Zaprojektowany system znacząco zmniejsza przetwarzanie danych wykonywane za pomocą układów FPGA pozostawiając je jedynie do odebrania danych z urządzeń pomiarowych i dokonania wstępnej obróbki. Autor pokazuje, że takie rozwiązanie jest możliwe i przetwarzanie danych z wykorzystaniem procesorów CPU charakteryzuje się odpowiednio niską latencją i wystarczająco wysoką przepustowością. Bardzo istotną motywacją do takich działań jest zmniejszenie ilości kodu FPGA bardzo trudnego w rozwoju i kosztownego w utrzymaniu.

Niestety, rozprawa nie precyzuje dokładnie na ile istotny był tutaj wkład autora, publikacje dotyczące tego rozwiązania posiadają wielu autorów i należy spodziewać się, że opracowany system jest wynikiem pracy zespołowej. Nie umniejsza to wkładu autora rozprawy, jednak jest on dość trudny do precyzyjnego określenia.

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

Wyniki przedstawione w rozprawie są dobrze udokumentowane, przedstawione w sposób jasny i zwięzły. W szczególności, przedstawione są przekonujące dane dotyczące wydajności tworzonych rozwiązań uzyskana na podstawie testów. W niektórych przypadkach (testy skalowalności) lepsze byłoby zastosowanie na wykresach skali logarytmicznej, co pozwoliłoby na łatwiejszą interpretację wyników.

Od strony językowej pewne wątpliwości budzi użycie podziału opisywanych systemów na część front-end (układ zbierający sygnał) i back-end (układ przetwarzający sygnał). Pojęcia te w informatyce stosuje się głównie do architektury systemów webowych (klient-serwer) i wykorzystanie analogicznego nazewnictwa do wydzielenia części systemu przetwarzania danych pomiarowych wydaje się niezręczne.

Od strony redakcyjnej praca jest napisana poprawnie i generalnie starannie, zgodnie z obowiązującymi zasadami. Użycie języka angielskiego nie budzi zastrzeżeń. W zasadzie nie ma błędów redakcyjnych – jedynie w rozdziale 7 niepoprawne są, znajdujące się w tekście, odnośniki do niektórych rysunków i wykresów. Przydałoby się również konsekwentne stosowanie kolejności kolumn w tabelach porównujących czasy wykonania skryptów Matlab i kodów napisanych w C/C++.

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

Bardzo istotnym mankamentem pracy jest brak informacji pozwalających ocenić czy zweryfikować część informatyczną. Autor poprzestaje na bardzo ogólnikowym opisie procesu przetwarzania danych i nie podaje bliższych informacji o stosowanych algorytmach. Informacja ta jest wystarczająca do oceny strategii zrównoleglenia aplikacji, jednak nie pozwala na ocenę wkładu pracy niezbędnego czy to do przeniesienia skryptów Matlab do C czy implementacji wersji równoległej. Dobrą praktyką w tym zakresie jest przedstawienie istotnych fragmentów kodu czy też algorytmów w postaci pseudokodu.

Autor nie podaje żadnych informacji na temat stworzonego kodu. Brak jest informacji o jego wielkości (np. liczby linii) i dostępności. Możliwość weryfikacji wyników poprzez zapoznanie się z kodem jest coraz powszechniejszym standardem informatycznym. Spodziewałbym się udostępnienia kodów w repozytorium, czy to otwartym czy dostępnym na żądanie i stosownej informacji.

W zakresie przetwarzania danych z wykorzystaniem technologii HPC i HTC widać nie za duże doświadczenie autora. Odpowiednie fragmenty rozprawy (głównie rozdziały 5 i 6) są poprawne, ale przedstawiają dość jednostronny punkt widzenia oparty przede wszystkim na materiałach firmy Intel. Wykonane prace dotyczą zrównoleglenia w stosunkowo niewielkiej skali (w praktyce kilkanaście rdzeni obliczeniowych) ograniczonej do jednego węzła obliczeniowego.

Brak bliższych informacji na temat algorytmów i ich implementacji utrudnia analizę przedstawionych wykresów, zwłaszcza w przypadku skalowalności rozwiązań równoległych. W szczególności trudno się odnieść do różnic pomiędzy opisanymi w pracy wariantami, których nieco różna wydajność przedstawiona jest na wykresie 7.12 (str. 131). Przedstawione wyjaśnienie jest bardzo ogólne.

W rozprawie brakuje zebranej informacji o publikacjach w jakich zostały przedstawione wyniki rozprawy oraz o konkretnym wkładzie autora. Informacje te są co prawda dostępne w postaci odnośników do poszczególnych pozycji literaturowych, ale ze względu na ich rozrzucenie w pracy trudne jest uzyskanie całościowego obrazu. Sprawy nie ułatwia zastosowany format bibliografii, który w przypadku prac z wieloma autorami wymienia tylko pierwszego.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Rozprawa dotyczy systemu przetwarzania danych pomiarowych w systemie TOKAMAK. Należy pamiętać, że zaawansowane systemy eksperymentalne takie jak LHC (Large Hadron Collider) czy TOKAMAK są w awangardzie rozwiązań technicznych tworzonych przez człowieka. Opracowany system przetwarzania danych pozwala na analizę dużego strumienia danych w czasie rzeczywistym. Tym samym pokazuje granice możliwości technicznych osiąganę przy wykorzystaniu aktualnie dostępnych rozwiązań (procesorów, układów FPGA). Istotnym osiągnięciem jest pokazanie możliwości zastąpienia układów FPGA poprzez procesory powszechnego użycia przy jednoczesnym zachowaniu niezbędnych parametrów wydajnościowej. Ze względu na dużą trudność w oprogramowywaniu układów FPGA jest to bardzo istotny rezultat.

8. Do której kategorii recenzent zalicza rozprawę?

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską Rafała Dominika Krawczyka, a także po zapoznaniu się z pozostałym dorobkiem naukowym i osiągnięciami mgra Krawczyka uważam, że **rozprawa doktorska magistra Rafała Dominika Krawczyka spełnia wymagania ustawowe i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim.**

Ryszard Biał

Dr hab. inż. Roman Stanisław Deniziak
Prof. nadzw. PŚk
Katedra Systemów Informatycznych
Politechnika Świętokrzyska
ul. 1000-lecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce

Kielce, 18.07.2018

Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej

Tytuł rozprawy: HPC/HTC Based Low-Latency Data Processing for Impurities in Tokamak Plasma Diagnostics

Autor rozprawy: mgr inż. Rafał Dominik Krawczyk

Promotor rozprawy: Prof. dr hab. inż. Ryszard Romaniuk

1. Cel, zakres, charakter i teza rozprawy

Rozprawa dotyczy opracowania systemu do szybkiego przetwarzania dużych zbiorów danych w procesie diagnostyki zanieczyszczeń gorącej plazmy tokamakowej. Problem dotyczył zarówno wyboru optymalnej heterogenicznej architektury sprzętowej systemu obliczeniowego jak i opracowania efektywnych algorytmów przetwarzania danych wykorzystujących obliczenia równoległe, optymalizację struktur danych oraz implementację heterogeniczną. Głównym celem rozprawy było opracowanie sprzętowo-programowej architektury systemu zapewniającej przetwarzanie danych pomiarowych w czasie rzeczywistym przy założonych ograniczeniach czasowych. Cel ten został sformułowany w postaci następującej tezy rozprawy:

„Możliwe jest opracowanie sprzętowo-programowej platformy do szybkiego przetwarzania danych, w celu wykonywania w czasie rzeczywistym obliczeń o wysokiej przepustowości, dla danych pochodzących z interfejsu reaktora termojądrowego WEST, w systemie do diagnostyki zanieczyszczeń gorącej plazmy tokamakowej, wg zaproponowanej metodyki projektowania i w oparciu o zaproponowany model”.

W zaproponowanej metodologii projektowania i modelu systemu autor określił założenia i ograniczenia dotyczące docelowego rozwiązania. Do najistotniejszych należą: architektura oparta o wieloprocessorowe komputery PC z wykorzystaniem akceleratorów i procesorów graficznych, interfejs wejściowy zaimplementowany w układach FPGA, projektowanie zorientowane na zrównoleglanie obliczeń, efektywne wykorzystanie pamięci i optymalizację kodu.

Cel został jasno sformułowany, biorąc pod uwagę liczbę kanałów wejściowych, wymaganą częstotliwość próbkowania, wymagany czas odpowiedzi systemu, wymagany

format danych, zostały określone wymagania dotyczące minimalnej przepustowości i maksymalnego czasu obliczeń systemu obliczeniowego. Autor wykazał, że istniejące rozwiązania nie spełniają tych wymagań, zatem konieczne jest opracowanie wyspecjalizowanego systemu. Ponadto, założeniem pracy było uzyskanie systemu elastycznego, umożliwiającego łatwą rozbudowę w przyszłości i łatwego w implementacji. Te założenia ukierunkowały badania na poszukiwanie rozwiązań wykorzystujących standardowe komponenty (platformy serwerowe PC, magistrala PCIe, system operacyjny MS Windows i Linux) i wysoce zoptymalizowane oprogramowanie utworzone w języku wysokiego poziomu (C++) z minimalizacją projektowania wyspecjalizowanych modułów sprzętowych (funkcji opisanych w HDL i implementowanych w układach FPGA).

Praca ma charakter projektowo-doświadczalny. Na podstawie wymagań dotyczących oczekiwanej szybkości przetwarzania danych, autor opracował metodykę wyboru optymalnej architektury sprzętowej, optymalizacji programów a także zaproponował model systemu. Następnie w oparciu o przedstawioną metodologię zaproponował rozwiązanie, które zweryfikował poprzez wykonanie szeregu eksperymentów obliczeniowych umożliwiających ocenę wydajności zaproponowanego rozwiązania.

2. Analiza źródeł

Bibliografia obejmuje 178 pozycji w tym 68 publikacji naukowych, pozostałe pozycje to dokumentacje techniczne, strony internetowe, podręczniki. Biorąc pod uwagę charakter i tematykę pracy, duża ilość źródeł prezentujących technologie związane z obliczeniami o wysokiej wydajności (HPC) jest jak najbardziej uzasadniona. Publikacje naukowe głównie dotyczą zagadnień związanych z tematyką pracy w zakresie systemów pomiarowych i obliczeń dla potrzeb fizyki wielkich energii (HEP). Zdecydowana większość publikacji pochodzi z ostatnich kilku lat, zatem jest aktualna. Ponadto niemal wszystkie pozycje są publikacjami o zasięgu międzynarodowym.

Przegląd źródeł jest przedstawiony w rozdziałach 1, 2. W przedmowie, stanowiącym wprowadzenie do tematyki pracy, autor przedstawił przegląd ogólnych publikacji związanych z projektem ITER i związanymi z tym projektem problemami badawczymi. Rozdział 2 przedstawia przegląd literatury związanej z diagnostyką zanieczyszczeń plazmy tokamakowej ze szczególnym uwzględnieniem istniejących systemów kontroli i diagnostyki plazmy. Rozdział ten zawiera też przegląd metod HPC w HEP. Ponadto w rozdziałach 4 i 5, prezentując model systemu i możliwości zastosowania technik HPC w systemie, autor przedstawił przegląd aktualnych rozwiązań sprzętowych zwiększających wydajność obliczeń jak i rozwiązania programowe takie jak techniki optymalizacji kodu, modele przetwarzania równoległego.

Przegląd źródeł zawiera zarówno prace naukowe jak i opis rozwiązań stosowanych w praktyce. Obejmuje zagadnienia zarówno z zakresu fizyki jak i elektroniki czy informatyki. Świadczy to o szerokiej, interdyscyplinarnej wiedzy autora, dotyczącej zarówno aktualnego stanu wiedzy jak i rozwiązań stosowanych w przemyśle. W każdym rozdziale przegląd istniejących rozwiązań kończy się wnioskami, będącymi punktem wyjścia do dalszych prac

autora. Wnioski te są przekonujące, stanowią motywację do podjętych prac badawczych i uzasadniają sens i oryginalność tych prac.

Chociaż przegląd literatury obejmuje większość zagadnień związanych z HPC i mimo że autor nawiązuje do systemów wbudowanych to w pracy brakuje odniesienia do dziedziny HPEC (High Performance Embedded Computing). W wykazie źródeł brakuje jakichkolwiek pozycji z tej dziedziny, zwłaszcza w zakresie prac naukowych, również w pracy autor nie odnosi się do żadnych rozwiązań dedykowanych tej dziedzinie. Być może rozwiązania te nie spełniałyby założeń pracy ale stosowane metodyki projektowania mogłyby stanowić inspirację autora do zastosowania bardziej formalnego podejścia w projektowaniu.

3. Metodyka badań

Metodyka badań zastosowana przez autora jest poprawna i co najważniejsze doprowadziła do osiągnięcia celu pracy i wykazania słuszności postawionej tezy. Najpierw autor sprecyzował wymagania dotyczące oczekiwanych parametrów wydajnościowych systemu, wymagania te wynikały z założeń dotyczących konstrukcji reaktora WEST. Następnie wykonał analizę podobnych rozwiązań i na tej podstawie zaproponował model systemu obliczeniowego oraz metodykę projektowania tego systemu. Zgodnie z tą metodyką najpierw została opracowana wersja podstawowa a następnie autor opracował wersję zoptymalizowaną dla danej platformy sprzętowej. Optymalizacja została wykonana na podstawie analizy możliwości optymalizacji kodu i z wykorzystaniem wybranych technik zrównoleglania obliczeń.

Autor uzyskał zamierzony cel pracy, co stanowiło jednocześnie dowód tezy. Wykonał szereg eksperymentów obliczeniowych potwierdzających, że opracowany system jest w stanie wykonać obliczenia w czasie rzeczywistym dla danych pobieranych z interfejsu reaktora WEST.

Założenia przyjęte w pracy są słuszne, chociaż w niektórych przypadkach autor nie podał wystarczającego uzasadnienia. Model systemu został zaproponowany na podstawie analizy istniejących rozwiązań jako uniwersalny system o dużej mocy obliczeniowej. Metodyka projektowania zakłada optymalizację i dobór konfiguracji metodą eksperymentalną, w dużej mierze opartą o wiedzę i doświadczenie projektanta. Tymczasem istnieją metodologie systematycznego projektowania wysoce wydajnych, wyspecjalizowanych systemów obliczeniowych. W takich metodologiach punktem wyjścia jest wysokopoziomowa specyfikacja projektowanego systemu (np. w formie sieci procesów), następnie na podstawie analizy złożoności obliczeniowej i przepływu danych określana jest optymalna architektura spełniająca założone wymagania. Stosując taką metodykę, możliwe jest uzyskanie rozwiązań o lepszych parametrach pod względem szybkości, kosztu, poboru energii.

Jednak w związku z tym, że celem pracy nie było uzyskanie systemu wysoce wyspecjalizowanego ani wysoce zoptymalizowanego, ale autor za bardziej istotne uznał takie parametry jak skalowalność, łatwość rozbudowy, elastyczność rozwiązania, to zastosowaną metodykę projektowania można uznać za poprawną i skuteczną w zakresie tematyki pracy.

4. Oryginalność uzyskanych wyników

Najważniejsze oryginalne osiągnięcia autora przedstawione w pracy to opracowany system obliczeniowy spełniający wymagania czasu rzeczywistego określone przez system pomiarowy tokamaka testowego WEST. System został zaimplementowany w rzeczywistym środowisku, wykonane eksperymenty potwierdziły jego wydajność i poprawność działania. Bardzo istotny jest praktyczny aspekt pracy. Opracowany system w istotny sposób przyczynił się do postępów przy budowie reaktora termojądrowego ITER.

Wartościowymi i oryginalnymi wynikami pracy są również przedstawione wyniki badań związanych z metodami przyspieszania obliczeń, które mogą być wykorzystane w innych tego typu pracach, zatem przyczyniły się do rozwoju metod informatycznych:

- wyniki prac związanych z przyspieszaniem obliczeń w środowisku MATLAB, poprzez implementację własnych funkcji MEX. Doświadczenia autora i wyniki przedstawione w pracy mogą być wykorzystane do przyspieszania obliczeń implementowanych w środowisku MATLAB;

- przegląd metod optymalizacyjnych obliczeń implementowanych w C++. Przedstawione techniki optymalizacyjne mogą stanowić cenną pomoc przy optymalizacji kodu, mającej na celu zwiększenie wydajności obliczeń dla współczesnych architektur komputerowych;

- metody zrównoleglania kodu. Doświadczenia autora i przedstawione wyniki stanowią cenną wiedzę związaną z możliwościami zrównoleglania obliczeń dla współczesnych platform obliczeniowych.

Wyniki prac autora zostały opublikowane w materiałach konferencji naukowych i czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Zatem zostały docenione jako oryginalny dorobek autora w odniesieniu do aktualnego stanu wiedzy. Ponieważ prace autora stanowią część projektu ITER, zatem przyczynią się do rozwoju poziomu techniki w zakresie fizyki wielkich energii.

5. Organizacja i redakcja rozprawy

Rozprawa składa się z 8 rozdziałów, bibliografii, wykazu skrótów. Rozdział pierwszy stanowi przedmowę, będącą krótkim wprowadzeniem do tematyki pracy. W rozdziale 2 autor przedstawił przegląd zagadnień związanych z kontrolą i diagnostyką zanieczyszczeń plazmy tokamakowej, przedstawił również istniejące podobne rozwiązania, w tym systemy obliczeniowe dużej mocy. Rozdział 3 zawiera opis celu pracy i tezę rozprawy. W rozdziale 4 autor przedstawił zaproponowany model i metodykę projektowania systemu. Rozdział 5 przedstawia przegląd zagadnień związanych z projektowaniem systemów obliczeniowych o wysokiej wydajności, w tym: modele zrównoleglania obliczeń, moduły obliczeniowe, techniki optymalizacji kodu. W rozdziale 6 autor przedstawił podstawową wersję systemu obliczeniowego opracowaną w środowisku Matlab, natomiast w rozdziale 7 została omówiona wersja zoptymalizowana systemu, stanowiąca wynik pracy. Rozdział 8 zawiera podsumowanie i wnioski.

Organizacja pracy jest logiczna i zrozumiała. Autor opisuje zagadnienia w sposób zwięzły i bez wnikania w niepotrzebne szczegóły. Praca jest starannie zredagowana, tekst pracy jest

przejrzysty. Uzyskane wyniki są przedstawione w formie wykresów i histogramów, co ułatwia interpretację i porównanie wyników.

Jedynym zastrzeżeniem dotyczącym układu treści jest to, że autor dopiero w rozdziale 6 przedstawił na czym polega problem obliczeniowy, tzn. określił jakie obliczenia mają być wykonywane przez system. Gdyby taka specyfikacja systemu pojawiła się wcześniej, tzn. przed rozdziałem 3, tematyka omówiona w rozdziałach 3-5 byłaby bardziej zrozumiała i uzasadniona.

Praca zawiera nieliczne błędy redakcyjne, takie jak:

- str. 80-81: przykłady zostały zamienione tzn. pierwszy dotyczy AoS a drugi SoA,
- str. 76: w przykładzie powinno być (*ptr)=temp;
- str. 120: na rys. 7.3 podpis pod dolnym rysunkiem chyba powinien brzmieć „HIGH NUMBER OF ACTIVE CHANNELS ..”
- str. 132: zamiast odwołania do rys. 7.12 powinno być 7.13,
- str. 134: zamiast odwołania do rys. 7.13 powinno być 7.14.

Ponadto niektóre rysunki nie są zbyt czytelne, np. na rys. 6.2 napisy są niewyraźne a na ciemnym tle prawie niewidoczne.

6. Uwagi krytyczne, wady i słabe strony rozprawy

Oprócz wcześniej przedstawionych uwag dotyczących redakcji rozprawy oraz metodyki badań wydaje się, że niektóre zagadnienia powinny być dokładniej przedyskutowane. W szczególności dotyczy to następujących problemów:

1. Punktem wyjścia do pracy było określenie wymagań w odniesieniu do minimalnej przepustowości systemu (20GB/s na wejściu, 0,97 GB/s na wyjściu) oraz maksymalnego czasu obliczeń (10ms). Założenia te są niewystarczające do rozpoczęcia procesu projektowania bez określenia złożoności obliczeniowej funkcji jakie ma implementować system. Motywacją do podjęcia prac powinno być wykazanie, że czas obliczeń w bezpośredniej implementacji systemu na serwerze PC znacząco przekracza założone ograniczenia.
2. Autor wykonuje różne eksperymenty na różnych platformach sprzętowych (Intel Core i5, Xeon) i w różnych środowiskach systemowych (MS Windows, Linux Ubuntu, CentOS). Stosowanie różnych środowisk utrudnia ocenę zmiany wydajności spowodowanej zmianą metody implementacji a nie zmianą środowiska uruchomieniowego.
3. Autor pomija szczegóły implementacji części „front-end”. Jest to część całego systemu i interesujące by były też parametry implementacji tej części (np. złożoność specyfikacji w HDL, wykorzystane zasoby FPGA, parametry wydajnościowe itp.).
4. W pracy przedstawione są różne możliwości akceleracji obliczeń poprzez wykorzystanie procesorów graficznych, systemów FPGA, koprocessorów. Jednak w końcowej implementacji autor nie rozpatrywał żadnej heterogenicznej architektury obliczeniowej części „back-end”. Pojawia się pytanie jaki był sens przedstawiania tego przeglądu skoro i tak autor nie uwzględniał tych komponentów w systemie

docelowym? Ponadto, nawet ze względów naukowych, interesujące byłoby pokazanie możliwości akceleracji danych obliczeń za pomocą GPU czy FPGA. Wyniki takich prac pokazałyby potencjalne dalsze kierunki prac.

5. Czas obliczeń jest zależny od liczby zdarzeń i impulsów, które się pojawiają w danej jednostce czasu. Dla dużej liczby impulsów czas obliczeń przekracza założone ograniczenie. Zasadne byłoby zatem w założeniach/tezach sprecyzować przy jakiej minimalnej liczbie zdarzeń i impulsów system ma spełniać ograniczenia czasowe. Liczba ta powinna odpowiadać wartościom otrzymywanym w rzeczywistych eksperymentach. Również w rozdziale 7 brakuje obliczeń pokazujących rzeczywistą przepustowość systemu (wejściową i wyjściową).
6. Pewne argumenty będące uzasadnieniem przyjętych założeń dotyczących architektury systemu nie są w pełni przekonujące. GPU i FPGA stają się już niemal standardem w systemach HPC, w tym jednym z głównych zastosowań jest szybkie przetwarzanie danych. To że pracują z mniejszą częstotliwością niż CPU nie oznacza, że obliczenia będą wykonywane wolniej. Systemy te zapewniają masową równoległość i w obliczeniach równoległych pozwalają na uzyskanie wielokrotnie większej szybkości przetwarzania niż wielordzeniowe CPU. Ponadto jednorodne środowisko programowania (OpenCL) zapewnia niezależność kodu od platformy, zatem systemy takie mogą być łatwo rozwijane i modyfikowane. Taki kierunek badań może się okazać bardziej przyszłościowy niż podejście zaprezentowane w pracy.

Wyżej wymienione problemy nie podważają poprawności metodologii badawczej i wartości uzyskanych wyników badań. Ale omówienie tych problemów przyczyniłoby się do lepszego zrozumienia i podkreślenia praktycznego znaczenia opracowanych rozwiązań.

7. Znaczenie uzyskanych wyników

Praktycznym efektem pracy jest system do diagnostyki zanieczyszczeń gorącej plazmy tokamakowej zintegrowany z systemem pomiarowym reaktora termojądrowego ITER. System umożliwia przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym i składa się z heterogenicznej platformy sprzętowej oraz z wysoce zoptymalizowanego oprogramowania przeznaczonego dla procesorów wielordzeniowych.

Z praktycznego charakteru pracy wynika duża przydatność opracowanego rozwiązania, przede wszystkim w zakresie zastosowania wyników w budowie reaktora ITER. Ale również praca jest wartościowa z punktu widzenia informatycznego. W pracy przedstawiony jest proces projektowania systemu HPC wykonującego obliczenia w czasie rzeczywistym. Doświadczenia i obserwacje autora mogą być pomocne przy tworzeniu podobnych systemów w innych dziedzinach zastosowań.

8. Ocena końcowa rozprawy

Podsumowując, uważam że rozprawa doktorska przedstawia oryginalne rozwiązanie zaprezentowanego w niej zagadnienia naukowego i projektowego. Autor podjął w niej problem, który ma istotne znaczenie w dziedzinie informatyki. Trafnie określił założenia

dotyczące jego analizy i uzyskane wyniki potwierdził wykonanymi eksperymentami. Wykazał się dobrą znajomością ogólnej wiedzy teoretycznej i praktycznej z zakresu tematyki pracy, a także umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim i niniejszym wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

