

dr hab. inż. Adam Krzysztof Piłat, prof. u.
Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie.
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Automatyki i Robotyki
Al. A Mickiewicza 30,
30-059 Kraków

Kraków 24.04.2026r.

ap@agh.edu.pl

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej
mgra inż. Marcina Hubacza

Wielordzeniowa maszyna wirtualna dla sterowników programowalnych

Promotor: Prof. dr hab. inż. Leszek Trybus

Promotor pomocniczy: dr inż. Bartosz Trybus

Podstawą opracowania recenzji jest zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja, dra hab. inż. Mariusza Oszusta z dnia 4go marca 2026 roku, wasz znak RE.530/6/2026/RDITIT.

1. Ocena aktualności wybranego tematu

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy opracowania wielordzeniowej maszyny wirtualnej dla sterowników programowalnych. W minionych latach dobrnęliśmy do fizycznej i energetycznej granicy zwiększania wydajności jednorodzeniowych mikroprocesorów. Projektanci i producenci zaproponowali architektury wielordzeniowe (ang. multi-core). Tradycyjny sposób zwiększania mocy, polegający

na podnoszeniu częstotliwości taktowania przestał być efektywny ze względu na ograniczenia termiczne. Również barierą okazało się zmniejszanie tranzystorów. Aktualna technologia mikroprocesorów koncentruje się na miniaturyzacji (poniżej 3 nm) oraz rozwoju konstrukcji chipletowych czyli wyspecjalizowanych układów scalonych stanowiących część większego procesora.

Nowoczesne rozwiązania automatyki łączą w sobie szereg zadań realizowanych na wielu poziomach (od bezpośredniej obsługi interfejsów sprzętowych, poprzez komunikację i archiwizację danych po optymalizację, wizualizację i interakcję z użytkownikiem. Realizacja wielu zadań w architekturze jednoprocessorowej wymagała programowania sekwencji lub zastosowania mechanizmów wątków, a i tak ostatecznie program był wykonywany na jednym rdzeniu co ograniczało obszary zastosowań. Aktualność rozprawy podkreśla fakt, iż architektura wielordzeniowa umożliwia jednoczesne wykonywanie wielu zadań (lub części jednego zadania) przez różne rdzenie. Procesor z czterema rdzeniami działającymi na niższym taktowaniu może wykonać więcej operacji w tym samym czasie, zużywając mniej energii niż jeden rdzeń działający na ekstremalnie wysokim taktowaniu. Współczesne systemy operacyjne i aplikacje (renderowanie wideo, gry, sztuczna inteligencja) są optymalizowane pod kątem wykorzystania wielu wątków jednocześnie. Od strony projektowania i realizacji złożonych układów automatyki niezbędne jest zapewnienie zgodności z normą IEC 61131-3, co stanowi tło przedłożonej rozprawy.

2. Cel realizowanej rozprawy doktorskiej i uzasadnienie przyjętej koncepcji badań

Cel rozprawy został jasno sformułowany przez doktoranta na stronie 8 w postaci: „opracowanie metody rozszerzania maszyny wirtualnej przeznaczonej dla środowiska jednorodzeniowego na środowisko wielordzeniowe, w którym rdzenie wykonują programy IEC 61131-3 mogące wymieniać sobą dane.”

Realizacja postawionego celu umożliwiłaby wykorzystanie zasobów sprzętowych nowoczesnych sterowników programowalnych niezależnie od ich architektury sprzętowej. Istotne jest, to że prowadzone prace będą miały na celu zapewnienie zgodności z normą IEC 61131-3 oraz opracowanie i zbadanie sposobów wymiany danych. Na podkreślenie zasługuje fakt, że prace będą dotyczyły środowiska CPDev, które w oryginalnej postaci zostało opracowane rozwiązań jednorodzeniowych. Należy zaznaczyć, że środowisko CPDev jest rozwiązaniem polskim, opracowanym na Politechnice Rzeszowskiej i zastosowanym komercyjnie przez LUMEL (system DCS), Praxis (podsystemy automatyzacji statków) oraz iGrid (moduły sterujące dla stacji telenergetycznych).

Cel rozprawy został jasno określony i jest ściśle powiązany z motywacją rozwoju środowiska CPDev i dostosowania go systemów wielordzeniowych. Przyjęta koncepcja polegająca na analizie aktualnej konfiguracji środowiska CPDev i jego aktualnych ograniczeń, zaproponowanie nowych rozwiązań oraz badania wydajności,

zajętości pamięci i efektywności energetycznej świadczą o słusznej koncepcji badań, które winny wykazać wady i zalety zaproponowanego rozwiązania.

3. Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej doktoranta

Na podstawie treści rozprawy stwierdzam, że doktorant wykazał się dogłębną znajomością zagadnień dotyczących sterowników PLC, mikroprocesorów i mikrokontrolerów, algorytmiki, programowania, maszyn wirtualnych, kompilatorów, podstaw elektroniki, automatyki i robotyki. Należy podkreślić znaczną wiedzę w zakresie rozwiązań informatycznych, w tym projektowania systemów i programowania. Należy podkreślić również znajomość normy IEC 61131-3 wraz z konsekwentnym realizowaniem jej wytycznych.

4. Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez doktoranta

Czytając rozprawę dało się poznać doktoranta jako eksperta w zakresie opracowywania metod projektowania systemów informatycznych, programowania oraz badania funkcjonalności i wydajności.

Dorobek naukowy doktoranta obejmuje 17 pozycji dokumentujących badania przeprowadzone w latach 2018-2025. Publikacje te dotyczą robotów mobilnych, znaczników RFID, mikrokontrolerów z architekturą ARM i systemów sterowania. Wyniki badań zostały opublikowane na łamach czasopism: *Pomiary, Automatyka i Robotyka*; *Electronics*; *Archives of Control Sciences* oraz zaprezentowane podczas konferencji. H-indeks dla Google Scholar dla 21 prac wynoszący 4 przy 36 cytowaniach, w tym zagranicznych, uznają za wystarczający dla tego etapu rozwoju naukowego.

Prezentowana rozprawa stanowi podsumowanie rozwoju i nabytych umiejętności przez doktoranta. Jednoautorskie publikacje doktoranta w czasopiśmie *Pomiary, Automatyka i Robotyka* potwierdzają umiejętność samodzielnego wykonania oraz udokumentowania badań. Udział w pracach zespołowych potwierdza wkład doktoranta w realizowane zamierzenia badawcze.

5. Ocena metody badawczej i oryginalnego dorobku autora

Autor pomimo znacznego dorobku publikacyjnego zdecydował się na zebranie wyników prac w postaci rozprawy doktorskiej obejmującej 90 stron, dwa dodatki (A i B) oraz spisy rysunków, tabel, listingów, skrótów, oznaczeń i 88 pozycji literatury tworząc dzieło obejmujące 116 stron. Rozdział pierwszy wprowadza czytelnika w zagadnienia programistyczno-wykonawcze sterowników, zaznajamia z pojęciem maszyny wirtualnej oraz stawia tezę pracy. W rozdziale drugim doktorant dokonał szczegółowego przedstawienia środowiska CPDev wraz z językiem pośrednim VMASM i kompilatorem. W rozdziale trzecim autor przedstawił architekturę maszyny wirtualnej oraz model denotacyjny oraz procedury symulacji i debugowania. Rozdział

czwarty opisuje metody zwiększania wydajności poprzez zastosowanie metod dostępu do pamięci i wyniki badań. W rozdziale piątym autor przedstawił koncepcję dwurdzeniowego sterownika programowalnego i uogólnienie dla procesora wielordzeniowego. W rozdziale 6tym zaproponował rozszerzenie środowiska CPDev dla dwóch rdzeni wraz z implementacją w mikrokontrolerze STM32. Rozdział siódmy to praktyczna demonstracja zastosowania zrealizowanego rozwiązania w postaci wielordzeniowego systemu eksploracji RFID z zastosowaniem cztero kołowego robota mobilnego.

Autor rozprawy dokonał analizy cech bazowego rozwiązania – środowiska programistycznego CPDev, przeprowadził badania wstępne i ocenił jego ograniczenia w kontekście nowych architektur sprzętowych. Świadomy tego sformułował tezę pracy i nakreślił koncepcję badań i rozwiązań, które mają doprowadzić do rozszerzenia środowiska CPDev do postaci użytecznej umożliwiającej realizację projektów automatyki dla platform wielordzeniowych. W sposób bardzo szczegółowy przedstawia zagadnienia dotyczące języków programowania, kompilacji, asemblacji. Omawia ograniczenia maszyn wirtualnych w wersjach 16 i 32 bitowej wraz z typami danych i rezerwowanym rozmiarem w pamięci. Szczególne miejsce zajmuje przedstawienie architektury maszyny wirtualnej oraz kilka mechanizmów adresowania pamięci. Stosowne ilustracje graficzne uzupełniają wiedzę czytelnika podczas lektury poszczególnych rozdziałów. Na szczególną uwagę zasługuje wprowadzenie modelu denotacyjnego, który opisuje w sposób matematyczny znaczenie programów. Tym samym maszyna wirtualna to funkcja transformująca stany, a realizowanie zadania odbywają się na wyższym poziomie abstrakcji. Należy podkreślić, że takie rozwiązanie gwarantuje poprawną realizację celu oraz ułatwia implementację w docelowym języku programowania. Kluczowym etapem w prowadzonych badaniach staje się analiza właściwej metody dostępu do pamięci. To właśnie w rozdziale czwartym, autor dogłębnie analizuje architektury ARM oraz przeprowadza badania maszyn wirtualnych w wersji 16 i 32 bitowej dla metod adresacji `BYTE_ACCESS` i `MEMCPY_ACCESS` przedstawiając wyniki dotyczące czasu cyklu wraz z komentarzem. Autor podejmuje analizę sposobów lokowania danych o różnych rozmiarach i przeprowadza badania dla trzech rodzajów maszyn wirtualnych przy różnej adresacji z i bez wyrównaniem. Ostatecznie komentuje wyniki i wyprowadza wnioski. Na zakończenie rozdziału czwartego autor wzmiankuje o efektywności energetycznej i różnym zużyciu energii przez maszyny wirtualne. W rozdziale piątym autor przedstawia szczegółową realizację rozszerzenia projektu dedykowanego jednozadaniowemu projektowi na sterownik dwurdzeniowy wraz ze współdzielonym obszarem pamięci do wymiany danych. Przedstawia organizację pracy sterownika dla rozwiązania dwurdzeniowego i uogólnia dla rozwiązania wielordzeniowego. Rozdział szósty i siódmy stanowią praktyczną realizację opracowanych metod, przedstawienie konfiguracji oraz analizę zrealizowanych zadań na sterownikach. Autor zwraca uwagę na aspekty implementacyjne, rozszerza model denotacyjny, prezentuje sposoby implementacji (podziału pamięci, wykorzystania semafora sprzętowego, współpracy maszyn wirtualnych, oraz zadania realizowane na poszczególnych rdzeniach). Badanie tych rozwiązań pozwoliło potwierdzić

poprawność funkcjonalną opracowanych metod. Realizując powyższe badania autor wykazał się również znajomością i świadomym zastosowaniem systemów operacyjnych w tym rozszerzeń dotyczących czasu rzeczywistego i umiejętnego skonfigurowania zadań dla poszczególnych rdzeni. Ostatecznie uzyskał rozwiązania spełniające założenia funkcjonalne dotyczące sterownika.

6. Niedociągnięcia dostrzeżone w rozprawie i problemy dyskusyjne

Należy przyznać, iż praca jest wyjątkowo starannie zredagowana pod względem językowym i graficznym.

Nawet okna aplikacji CPDev ilustrujące rozwiązanie inżynierskie pozwalają czytelnikowi zapoznać się ze specyfiką realizacji poszczególnych problemów. Grafiki są wykonane starannie i ilustrują architektury, algorytmy, wyniki badań. Niektóre z rysunków można by zamieścić w załączniku gdyż mają one charakter typowo inżynierski np. rys. 2.2, 3.3, 3.4, 6.9, 7.6, 7.9, 7.10,

Ze względu na ścisłe powiązanie pracy z układami sterowania oraz praktyczną demonstracją funkcjonowania opracowanej metody w zadaniu sterowania robotem mobilnym uważam, że dokumentacja wyników badań winna być lepiej zilustrowana. Szkoda, że autor nie zaprezentował wykresów stanów i sterowania w funkcji czasu, w tym realizacji poszczególnych zadań. Czy można narysować diagram czasowy zadań realizowanych przez poszczególne rdzenie z uwzględnieniem zadań realizowanych pod kontrolą FreeRTOSa? Należy zauważyć, że autor sam ma świadomość występowania rozmaitych zakłóceń związanych z chwilowymi poślizgami, błędami IMU, niesymetrią kół, różnicami momentów czy brakiem zbieżności. Wprowadzone zabiegi korekcyjne są jak najbardziej słuszne, jednakże analiza stanów i sterowań podczas wykonywania zadania eksploracji pozwoliłaby jednoznacznie wykazać poprawność sterowania realizowanego pod kontrolą wykonywanych zadań. Można bowiem stawiać pytania o zależności czasowe w sterowaniu, następstwo zdarzeń, zwłaszcza, że krytyczne jest obracanie robota o kąt 90° . Więcej, praca doktorska obejmująca badania eksperymentalne powinna zawierać szczegółowe omówienie wyników badań wraz z ilustracjami i analizami jakościowymi.

Jaka jest formuła na sterowanie dla zastosowanego regulatora PID? Dlaczego zastosowano manualne strojenie nastaw regulatora? Jak przeprowadzono kalibrację czujnika IMU? Czy w przedmiotowej realizacji sterowania napędami robota mogą wystąpić opóźnienia? Jeśli tak, to jakie mogą być ich konsekwencje? Czy możliwa jest kontrola poślizgu i innych zakłóceń związanych z przenoszeniem napędu poprzez analizę sygnałów pomiarowych kąta obrotu i natężenia prądu? Jak można rozszerzyć projekt o taką dodatkową funkcjonalność?

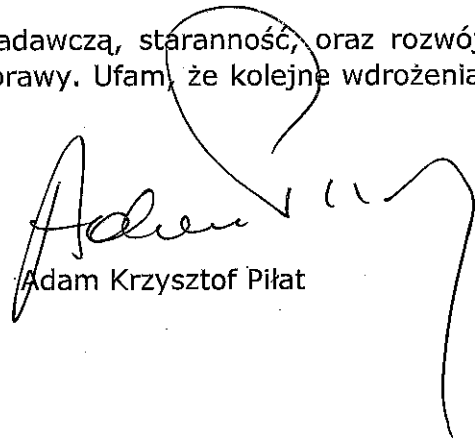
Uwagi i postawione pytania nie umniejszają wartości merytorycznej pracy a wskazują na obszary, które wymagają doprecyzowania i rozszerzenia oraz mogą stać się przedmiotem prezentacji i dyskusji podczas publicznej obrony.

7. Końcowa ocena rozprawy

Moja ocena rozprawy jest pozytywna pomimo zgłoszonych powyżej spostrzeżeń. Pragnę podkreślić, że praca ma charakter wdrożeniowy. Rozprawa stanowi ważny wkład w metody projektowania architektury oraz zadań pomiarowo-sterujących dla aplikacji automatyki i robotyki, w szczególności realizowanych na wieloprocesorowych platformach sprzętowych. Opracowanie informatyczne świadczyć będzie rolę służebną dla rozwiązań w obszarze sterowania. Doktorant jednoznacznie dowiódł swoich umiejętności i profesjonalizmu w obszarze informatyki oraz potwierdził predyspozycje do prowadzenia badań naukowych. Przedmiotową rozprawą oraz wypracowanym dorobkiem naukowym doktorant wykazał się wiedzą i umiejętnościami wymaganymi w Dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Hubacza pt.: "Wielordzeniowa maszyna wirtualna dla sterowników programowalnych" merytorycznie spełnia wymagania Ustawy z dnia 18 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Jednocześnie doceniając konsekwentną pracę badawczą, staranność, oraz rozwój polskiego rozwiązania wnoszę o wyróżnienie rozprawy. Ufam, że kolejne wdrożenia przyczynią się do rozwoju polskiego przemysłu.



Adam Krzysztof Piłat