

Warszawa, 30.05.2026

Prof. dr hab. inż. Jan Maciej Kościelny
Instytut Automatyki i Robotyki
Wydział Mechatroniki
Politechnika Warszawska
ul. św. A. Boboli 8
02-525 Warszawa
tel. kom. 601 810 419
e-mail: jan.koscielny@pw.edu.pl

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Marcina Hubacza

Wielordzeniowa maszyna wirtualna dla sterowników programowalnych

1. Tematyka oraz cel rozprawy

Tematem rozprawy są zagadnienia rozwoju środowiska CPDev (Control Program Developer), które jest narzędziem do tworzenia oprogramowania dla systemów sterowania. CPDev został opracowany w Politechnice Rzeszowskiej w zespole kierowanym przez prof. Leszka Trybusa. Środowisko CPDev jest pakietem inżynierskim przeznaczonym do programowania sterowników PLC/PAC zgodnie z normą PN/EN 61131-3 (IEC). Typowe aplikacje to: przetwarzanie sygnałów pomiarowych, sterowanie logiczno-sekwencyjne, regulacja, obliczenia procesowe, statystyczne i inne. Program użytkownika, skompilowany w komputerze PC do uniwersalnego kodu binarnego, jest wykonywany na sterowniku przez program runtime funkcjonujący jako maszyna wirtualna. Maszyna wirtualna oznacza procesor zrealizowany programowo, co pozwala implementować go na różnych platformach sprzętowych. Maszyna wirtualna CPDev uzupełniona o funkcje niskopoziomowe producenta może być implementowana na różne platformy sprzętowe, np. AVR, ARM, PC z kartami I/O itp.

Środowisko CPDev pierwotnie było przeznaczone do wykonywania jednego zadania ze stałym cyklem, co zwykle wystarcza w podstawowych zastosowaniach. Od pewnego czasu dostępne są procesory wielordzeniowe, umożliwiające rozdzielenie realizowanego programu na kilka rdzeni, co może znacząco skrócić czas jego wykonywania. W przypadku realizacji różnych zadań o odmiennych cyklach realizacji, np. sterowania binarnego, regulacji, przetwarzania zmiennych procesowych konieczny jest albo wielozadaniowy system operacyjny czasu rzeczywistego, albo wielordzeniowe procesory umożliwiające wymianę danych między rdzeniami. W pracy zastosowano to drugie rozwiązanie. Głównym celem rozprawy było „*opracowanie metody rozszerzenia maszyny wirtualnej przeznaczonej dla środowiska jednordzeniowego na środowisko*

wielordzeniowe, w którym rdzenie wykonują programy IEC 61131-3 mogące wymieniać między sobą dane.”

2. Zawartość i struktura rozprawy

Praca liczy 116 stron i zawiera: streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści, osiem rozdziałów, dwa dodatki, spisy rysunków i tabel, wykazy skrótów i oznaczeń oraz wykaz literatury.

Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem do rozprawy i zawiera cel pracy. W rozdziale drugim przedstawiono środowisko programistyczno-wykonawcze CPDev, a w rozdziale trzecim omówiono maszynę wirtualną tego środowiska. W rozdziale czwartym dokonano analizy wpływu różnych metod dostępu do pamięci na wydajność (czas wykonywania programu) maszyn wirtualnych VM16, VM32 i VM32A. Stwierdzono, że biorąc pod uwagę metody dostępu oraz rozmiary pamięci programów testowych dla różnych maszyn, wybór rozwiązania powinien zależeć od przeznaczenia projektowanego sterownika.

Koncepcja rozszerzenia jednordzeniowej maszyny wirtualnej do wersji dwurdzeniowej została podana w rozdz. 5. Określono podstawowe warunki dla projektów dwurdzeniowych i organizację pracy takiego sterownika. Koncepcję tę uogólniono na przypadek procesora wielordzeniowego. Opracowaną koncepcję zastosowano (rozdział 6) do rozszerzenia środowiska CPDev z implementacją w dwurdzeniowym kontrolerze STM32. Bardziej rozbudowany projekt jest przedstawiony w rozdz.7. Zadaniem robota mobilnego wyposażonego w czytnik RFID i enkodery jest identyfikacja znaczników RFID rozmieszczonych na płycie jako siatka kwadratowa. Robot sterowany jest przez dwurdzeniowy mikrokontroler ESP32. Całością systemu zarządza czterordzeniowy Raspberry Pi, komunikujący się ze sterownikiem robota przez Wi-Fi. Przedstawiono architekturę systemu, omówiono: współpracę trzech maszyn wirtualnych, projekt CPDev dla tego systemu eksploracji oraz implementację laboratoryjną. Ostatni ósmy rozdział to podsumowanie wyników pracy.

Wykaz cytowanej literatury zawiera 88 pozycji, w tym istotne publikacje związane z tematem rozprawy. Można stwierdzić, że jest to solidnie opracowany i aktualny przegląd literatury dotyczącej tematyki pracy. Ponadto 5 cytowanych prac, to publikacje, których współautorem jest doktorant.

3. Oryginalne wyniki rozprawy

Osiągnięcia Autora rozprawy oraz jej oryginalne elementy dotyczą koncepcji rozszerzenia jednordzeniowej maszyny wirtualnej do wersji wielordzeniowej oraz wykazania jej poprawności oraz funkcjonalności na przykładach praktycznych.

Założono, że w każdym rdzeniu procesora ma funkcjonować rozszerzona maszyna wirtualna CPDev, mogąca wymieniać dane z innymi rdzeniami za pośrednictwem

pamięci współdzielonej. Na zaproponowaną metodę rozszerzenia maszyny składają się cztery przyjęte zasady:

- 1) jednakowe deklaracje wymienianych zmiennych globalnych w projektach rdzeni,
- 2) atrybuty tych zmiennych określające zapis lub odczyt do/z pamięci współdzielonej,
- 3) wymiana zmiennych na początku i końcu cyklu sterowania danego rdzenia,
- 4) eliminacja konfliktów rdzeni przy dostępie do pamięci współdzielonej.

Przyjęto również, że wielordzeniowa maszyna wirtualna nie musi korzystać z systemu operacyjnego czasu rzeczywistego RTOS.

W środowisku CPDev, zorientowanym na zastosowania w sterownikach programowalnych, stosowany jest język pośredni VMASM, którego instrukcje odpowiadają funkcjom normy IEC 61131-3 lub jako procedury systemowe dotyczą architektury maszyny. Język ten został w recenzowanej pracy rozszerzony o nowe procedury dla pamięci współdzielonej.

Ze względu na ten unikatowy język pośredni środowiska CPDev funkcjonowanie maszyny wirtualnej przedstawiono w rozprawie za pomocą semantycznych modeli denotacyjnych odpowiadających architekturze maszyny. Modele denotacyjne bezpośrednio sugerują rozwiązania programowe, które można implementować w dowolnym imperatywnym języku, np. C/C++, Java, Python, itd.

Przedstawioną metodę zweryfikowano na dwóch praktycznych przykładach. W pierwszym dwurdzeniowy mikrokontroler STM32 w płytce uruchomieniowej wykonuje dwa powiązane projekty sterowania z eliminacją konfliktów za pomocą semafora sprzętowego. Do symulacji projektów wykonywanych z różnymi cyklami wykorzystano wielowątkowy WinController.

Jako drugi przykład postąpił laboratoryjny system eksploracji płyty ze znacznikami RFID, składający się z robota mobilnego z dwurdzeniowym mikrokontrolerem ESP32 oraz z czterordzeniowego mikrokomputera Raspberry Pi jako jednostki nadrzędnej. Urządzenia komunikują się poprzez WiFi. Trzy maszyny wirtualne systemu funkcjonują w izolowanych rdzeniach wyłączonych z harmonogramowania przez system Linux (Raspberry Pi) i FreeRTOS (ESP32). Mechanizmy muteks nie dopuszczają do konfliktów między maszynami. Ze względu na brak zewnętrznego systemu lokalizacji robota i znaczników RFID eksploracja płyty przebiega w sposób półautomatyczny.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne.

W pracy nie znalazłem błędów merytorycznych. Zarówno koncepcja rozwiązania problemu jak też przykłady umożliwiające weryfikacje rozwiązania nie budzą żadnych zastrzeżeń. Poniższe uwagi krytyczno-diskusyjne są sformułowane z pozycji automatyka, czyli osoby tylko pośrednio związanej z informatyką i telekomunikacją.

W rozprawie brakuje mi szerszego porównania rozwiązań stosowanych w zaawansowanych sterownikach programowalnych do realizacji zadań o niejednakowych okresach ich wykonywania: wielordzeniowych procesorów umożliwiających wymianę danych między rdzeniami oraz wielozadaniowego systemu operacyjnego czasu rzeczywistego RTOS.

Druga uwaga dotyczy wyboru przykładów weryfikacji praktycznej wielordzeniowej maszyny wirtualnej dla sterowników programowalnych. Są one jak najbardziej poprawne i pozwalają w pełni zweryfikować opracowane rozwiązanie. Jednak najczęściej w praktyce realizowane są zadania sterowania logiczno-sekwencyjnego oraz regulacji bazującej na algorytmach PID. Takiego przykładu nie podano, ale nie umniejsza to wartości uzyskanych wyników.

Drobnym mankamentem jest też zbyt lakonicznie omówienie strojenia regulatora PID w napędzie robota mobilnego.

5. Podsumowanie

Recenzowana praca doktorska lokuje się w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Na podstawie lektury pracy można stwierdzić, że Autor jest specjalistą w zakresie tworzenia narzędzi programowych dla systemów sterowania. Świadczy o tym dobra orientacja w stanie badań w zakresie tematyki rozprawy, sposób rozumowania, umiejętność formułowania wniosków, solidność prowadzonych analiz. Potencjał użyteczności praktycznej uzyskanych wyników jest znaczący. Autor wykazał umiejętność rozwiązywania trudnych problemów badawczych i technicznych.

Wobec osiągnięcia postawionego celu w formie rozszerzenia maszyny wirtualnej na procesory wielordzeniowe, opracowania denotacyjnych modeli oprogramowania oraz dwóch praktycznych przykładów demonstrujących sposób zastosowania metody jednoznacznie pozytywnie oceniam rozprawę doktorską mgr inż. Marcina Hubacza pt. *Wielordzeniowa maszyna wirtualna dla sterowników programowalnych*.

W związku z powyższym stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska pana mgr inż. Marcina Hubacza spełnia wszystkie wymagania stosownej ustawy o tytułach i stopniach naukowych. Wnoszę zatem o przyjęcie opiniowanej rozprawy oraz dopuszczenie jej do publicznej obrony przez Radę Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza.

