

## 6 Podsumowanie

W mojej ocenie:

- autor w pełni zrealizował cel postawiony we Wstępie,
- praca ma właściwą strukturę, jest kompletna i napisana wzorowo pod względem edytorskim,
- rozprawę cechuje wysoka przydatność dla nauk inżynieryjno-technicznych,
- tematyka pracy jest ściśle związana z dyscypliną naukową *Automatyka i Robotyka*,
- rozprawa **spełnia z wyraźnym nadmiarem** wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy.

Biorąc pod uwagę wnioski zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania określone w art. 13 ust 1. Ustawy z dnia 14.03.2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 21.06.2016, poz. 882) wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

Grzegorz Wójcik  
03.06.2020

Kraków, dn. 30.06.2020r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
magistra inżyniera Andrzeja Wojtulewicza  
z tytułem  
Projektowanie systemów sterujących wykorzystujących  
algorytmy regulacji predykcyjnej i struktury FPGA.**

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Prof. dr. hab. inż. Michała Malinowskiego, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej - pismo z dnia 12.05.2020r. Zlecenie dotyczy oceny spełniania przez rozprawę doktorską mgr. inż. Andrzeja Wojtulewicza: Projektowanie systemów sterujących wykorzystujących algorytmy regulacji predykcyjnej i struktury FPGA., warunków określonych w art. 13, ust 1, ustawy o stopniach i tytule naukowym.

**1. Zagadnienia naukowe i naukowo-techniczne rozprawy**

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej dotyczy realizacji sterowania predykcyjnego w układzie programowalnym FPGA.

W rozprawie rozpatrywane są zagadnienia istotne dla sterowania bezpośredniego obiektami o relatywnie krótkich stałych czasowych – rzędu milisekund. Wybrane metody regulacji predykcyjnej uruchomione w układzie FPGA zostały zastosowane do trzech modeli laboratoryjnych charakteryzujących pewne klasy systemów dynamicznych. Przeprowadzone badania potwierdziły słuszność realizacji sterowania w tej klasie układów programowalnych.

Motywacją do realizacji przedmiotowej pracy doktorskiej było zapotrzebowanie na realizację algorytmów sterowania predykcyjnego dla systemów dynamicznych o stałych czasowych rzędu milisekund. Zastosowanie struktur programowalnych FPGA wydaje się być słusznym rozwiązaniem. Ostatecznie można podjąć dyskusję

**Dr hab. inż. Adam Krzysztof Piłat, prof. uczelni**

**Akademia Górniczo-Hutnicza im Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
Katedra Automatyki i Robotyki**

Kierownik laboratoriów: robotyki, fotowoltaiki i lewitacji magnetycznej  
Al. A. Mickiewicza 30 C3-6, 30-059 Kraków,  
tel. +48 12 61734844, fax +48 12 6341568  
e-mail: ap@agh.edu.pl, home.agh.edu.pl/~ap, www.maglev.agh.edu.pl



na temat złożoności metodyki projektowania takiego układu regulacji dla układu FPGA, procesorów sygnałowych i układów wieloprocessorowych.

Cel, teza i zakres rozprawy zostały sformułowane przez autora w rozdziale pierwszym. Postawiona teza „Przedstawiona metodyka umożliwi zaprojektowanie systemów sterujących szybkich procesów czasu rzeczywistego, wymagających bardzo krótkich okresów próbkowania, rzędu milisekund” została udowodniona w pracy poprzez opracowanie warsztatu badawczego stanowiącego kompletne rozwiązanie teoretyczno-praktyczne wraz z obiektami testowymi. Autor w sposób systematyczny prowadzi czytelnika poprzez kolejne zagadnienia związane z rozprawą i sformułowaną tezą omawiając zasadę i typy regulacji predykcyjnej, sposoby realizacji z wykorzystaniem różnych rozwiązań sprzętowych, przedstawiając architekturę układów FPGA. Szczegółowo omawia opracowany system do regulacji predykcyjnej, wybrane rozwiązanie sprzętowe i stanowiska testowe. Wyniki badań eksperymentalnych potwierdzają walory zaproponowanego rozwiązania oraz otwierają drogę do projektowania różnego typu regulatorów osadzonych w strukturach FPGA.

## **2. Organizacja i redakcja rozprawy, odniesienia do literatury**

Rozprawa obejmuje 176 stron maszynopisu, 128 pozycji literatury (s. 177÷185), w tym 2 pozycje samodzielne, 6 pozycji współautorskich doktoranta (w tym 5 jako pierwszego autora) z Promotorem zawartych w spisie literatury. Rozprawa została podzielona na 9 rozdziałów (wliczając wstęp oraz podsumowanie i wnioski) oraz literaturę. Pozycje bibliograficzne dobrze pokrywają zakres tematyczny rozprawy.

Praca została zredagowana starannie przy zachowaniu zasad edytorskich oraz dbałości o szczegóły. Drobne uchybienia edycyjne wymieniłem w pkt. 5 niniejszej recenzji. Struktura pracy jest prawidłowa, a czytelnik jest prowadzony umiejętnie przez poruszane w kolejnych rozdziałach zagadnienia.

## **3. Osiągnięcia naukowe i uwagi pozytywne**

W mojej ocenie oryginalne i pozytywne osiągnięcia rozprawy stanowią:

- Opracowanie metodyki projektowania regulatorów dla układów FPGA (realizacja i testowanie) w tym metody przyspieszenia i optymalizacji kodu

projektu z wykorzystaniem możliwości i uwzględnieniem ograniczeń układów FPGA.

- Opracowanie, wykonanie, udział w wykonaniu trzech stanowisk badawczych: grzejąco-chłodzącego, świetlnego i serwomechanizmu, co wymagało zaprojektowania architektury stanowiska, płytek drukowanych, doboru komponentów elektronicznych, interfejsu w celu podłączenia do płyty sterującej z układem FPGA.
- Realizację algorytmów regulacji predykcyjnej: DMC i GPC – oba warianty w trzech wersjach: analitycznej, analitycznej oszczędnej i numerycznej,
- Dyskusję czasów obliczeń uzyskanych dla omawianych metod,
- Wybór modeli matematycznych do reprezentacji rozważanych obiektów testowych ze względu na możliwości realizacji algorytmów sterowania predykcyjnego w układzie FPGA.

Na szczególne wyróżnienie zasługuje rozdział czwarty, w którym autor opisuje zastosowania układów FPGA. Dobry przegląd literatury ze szczegółową analizą zagadnień związanych z pracą stawia omawiane dzieło w aktualnym stanie techniki, potwierdzając zasadność i ważność podjętej tematyki.

Moim zdaniem najbardziej wartościowe rozdziały tej pracy to rozdział 5 i 8. W rozdziale piątym autor przedstawia zrealizowaną warstwę programową. Opracowane algorytmy, zaprojektowanie pracy całego systemu sterowania, wykorzystanie metod akceleracji stanowią realizację omawianej pracy i wykazują ścisłe powiązanie z teorią przedstawioną w rozdziale 2 i umiejętność projektowania architektur programowalnych do realizacji zadań regulacji. Doceniam wkład pracy doktoranta w realizację tych zamierzeń. Wykazał się znajomością i kreatywnością przy realizacji zagadnień w układzie FPGA, rozumiejąc jednocześnie zasady jego funkcjonowania, możliwości i ograniczenia umiejętnie wykorzystując je na potrzeby realizacji omawianej pracy. Rozdział 6 ukazuje profesjonalizm warsztatu inżynierskiego w zakresie integracji obiektów z platformą sterującą. W rozdziale 8 autor pokazuje wyniki badań eksperymentalnych regulacji predykcyjnej opisanej w rozdziale 2, zrealizowanej metodami opisanymi w rozdziale 5 z wykorzystaniem integracji platformy FPGA (rozd. 6) ze stanowiskami laboratoryjnymi (rozd. 7) potwierdzając jednocześnie poprawność działania zrealizowanych algorytmów w układzie FPGA. Autor formułuje ważne wnioski dotyczące realizacji i czasu obliczeń.

#### 4. Wątpliwości i uwagi krytyczne

Analiza pracy przyczyniła się do sformułowania pytań, które umieszczam w kontekście omawianych zagadnień.

Rozdział 2 omawia algorytmy regulacji predykcyjnej. Czy i przy jakich założeniach przewidywanie przyszłego zachowania się układu/obiektu przy stanie początkowym i zadanych sterowaniach jest możliwe? Jaki jest wpływ zakłóceń, nieliniowości systemu? Na str. 11, pkt. 1, 2, 3, 4 przy opisywaniu wad stosowania układów FPGA do regulacji predykcyjnej należało podać odesyłać do literatury dla każdej z wymienianych wad.

Ważna jest możliwość określenia przewidywanego czasu obliczeń zadań optymalizacji kwadratowej (s. 25), co ma istotne znaczenie w warunkach realizacji sterowania w czasie rzeczywistym. Czy można szacować czas obliczeń w czasie rzeczywistym?

Na str. 27 autor wspomina o niedokładnym modelu procesu w kontekście określania horyzontu predykcji. Jednakże, w pracy zabrakło analizy zbieżności otrzymanych modeli z odpowiedziami obiektów: s. 154 – stanowisko grzejąco-chłodzące - brak odpowiedzi modelu i procesu oraz oceny zbieżności; s. 164 stanowisko świetlne – są porównane znormalizowane odpowiedzi skokowe, komentarz do rys. 8.12 jest lakoniczny, brak oceny zbieżności i komentarza dot. postaci przyjętego modelu; s. 169 stanowisko serwomechanizm - brak odpowiedzi modelu i procesu oraz oceny zbieżności. Tym samym padają pytania: czy zaproponowane modele są słuszne dla całego obszaru stanów i sterowań dopuszczalnych? Jaka jest zbieżność zaproponowanych modeli do rozważanych procesów? Czy z sukcesem zrealizowane sterowanie predykcyjne mogłoby charakteryzować się lepszą jakością w przypadku zastosowania dokładniejszych modeli? Jakie były by tego konsekwencje z punktu widzenia realizacji takiego sterowania w układzie FPGA?

Autor zakłada stałe wartości zadane sygnałów regulowanych na horyzoncie predykcji (str. 26). Jak to założenie jest spełnione dla przeprowadzonych eksperymentów?

Na str. 28 autor wspomina o problemach braku pamięci. Czy zatem można precyzyjnie wyznaczyć wymagania co do zajętości pamięci dla poszczególnych obiektów i algorytmów?

Na str. 33 autor stwierdza, że lepiej stosować „bezpieczne” regulatory PID? To sformułowanie wymaga szerszego komentarza.

Autor mówi o pracy równoległej poprzez zastosowanie 4 niezależnych procesorów (s. 39). Uważam, że fragment ten należy poszerzyć o komentarz dotyczący mechanizmów synchronizacji.

Autor na str. 48 opisuje algorytm DMC i jego metodę klasyczną i oszczędną stwierdzając, że czas obliczeń algorytmu jest 100 krotnie krótszy w porównaniu z wersją klasyczną. Nasuwa się pytanie: co można powiedzieć o jakości regulacji porównując obie metody?

Autor ma do dyspozycji platformę FPGA z zegarem taktującym o częstotliwości MHz. Tymczasem opisuje możliwości pomiarowe czasu na poziomie ms lub mikrosekund: s. 96, .. pomiar czasu z dokładnością 1ms przy ...; s. 96, Dokładność pomiaru jest w tym przypadku rzędu 0.1ms. Jaki jest wpływ takich wartości dokładności na działanie algorytmu sterującego? Czy nie można zastosować nanosekundowej rozdzielczości?

Lektura rozdziału 8 pozostawia pewien niedosyt w postaci braku informacji co do jakości regulacji. Dobrze by było opatrzyć ten rozdział porównaniem wartości uzyskanych dla kilku wskaźników jakości. Opisy różnic w działaniu algorytmów nie są podparte wartościami wskaźników jakości, a te są dla automatyka wyznacznikiem oceny. Zabrakło również analizy stabilności i odporności przy zastosowaniu proponowanych metod sterowania.

W celu poszerzenia wiedzy polecam lekturę prac doktorskich: P.Bania: „Algorytmy sterowania optymalnego w nieliniowej regulacji predykcyjnej”, AGH 2008 oraz P.Piątek: „Wykorzystanie specjalizowanych architektur sprzętowych do realizacji krytycznych czasowo zadań sterowania”, AGH 2007.

## **5. Wybrane uwagi edycyjne**

Należy podkreślić fakt, iż praca została starannie zredagowana, w tym opatrzona poprawnie równaniami matematycznymi oraz ilustracjami. Drobne uchybienia edycyjne nie wpływają na jakość merytoryczną pracy, a jedynie służą zwiększeniu staranności rozprawy:

- s. 16, Wartość ... są,
- s. 42, pkt. 3.3, ... muszą być przede wszystkim działać,
- s. 44, Każdy sterowniki ...,

- s. 47, czy autor miał na myśli magistralę I<sup>2</sup>C, pisząc I2C,
- s. 50, Szybkości przetwarzania ... pozwala,
- s. 51, powstaje algebra Boole'a stworzona przez ...,
- s. 52, ... był w stanie przetwarzać kilka ...,
- s.65, pierwsze pojawienie się nazwy (kolejne na s. 67) System On Chip – brak jednoznacznego zapisu i zmiana lokalizacji pierwszego skrótu,
- s. 74, ... możliwość dołożenia własnego ...,
- s. 74, Procesora NIOS II ma architekturę ...,
- s. 74, ... wymaga dołożenia modułu ...,
- s. 100, ... jest generacji odpowiednich parametrów ... wklejenia ...,
- symbole użyte w tekście nie odpowiadają symbolom użytym w równaniach, aczkolwiek można się łatwo domyślić, które należy zastosować, przykładowo: s. 102 (Ke, Ku), (Ku); 105 (Kyzad, Ku, Ky), (Ku), (Ke),
- nagminne używanie anglicyzmu „implementować”,
- użycie słowa stwarzać, myślę, że warto zastanowić się nad genezą tego słowa.

## 6. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Przedstawiona do recenzji rozprawa zdaniem recenzenta stanowi ważne i wartościowe osiągnięcie w rozwoju nauk technicznych, w tym w szczególności ukierunkowanych na praktyczną realizację algorytmów układów automatycznej regulacji. Opracowanie metodyki projektowania i realizacji algorytmów sterowania predykcyjnego w strukturach FPGA pozwala na realizację sterowania w czasie rzeczywistym. Metodyka ta może być z powodzeniem zastosowana do innych klas regulacji oraz szerokiej gamy obiektów fizycznych. Tym samym obszar zastosowania poszerza się między innymi na komponenty elektromechaniczne, które charakteryzują się stałymi czasowymi rzędu mikro czy milisekund w zależności od konfiguracji. Interesującym obszarem zastosowania mogłyby być akceleratory liniowe stosowane w aplikacjach badawczych lub militarnych.

## 7. Wniosek końcowy

Zdaniem recenzenta, rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Wojtulewicza spełnia wymagania stawiane w art. 13. Ust. 1. Ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U.

z dnia 21.06.2016r., poz. 882) stawiane pracom na stopień doktora nauk technicznych.

Wnoszę o dopuszczenie przedmiotowej rozprawy doktorskiej do publicznej obrony pracy doktorskiej w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika.

Recenzent

  
Dr hab. inż. Adam Krzysztof Piłat, prof. uczelni



Kraków, dn. 30.06.2020r.

**Rada Naukowa Dyscypliny  
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika  
Politechniki Warszawskiej  
Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej  
mgr. inż. Andrzeja Wojtulewicz:**  
**pt.: Projektowanie systemów sterujących wykorzystujących  
algorytmy regulacji predykcyjnej i struktury FPGA.**

*Wysoka Rado*

Mając na uwadze zakres rozprawy obejmujący kompleksowo zagadnienia integracji sprzętowej komponentów elektronicznych, opracowanie trzech stanowisk badawczych, opracowanie metodyki projektowania algorytmów regulacji predykcyjnej do wbudowania ich w platformę programowaną, przeprowadzenie badań eksperymentalnych, których wyniki potwierdzają sterowanie w czasie rzeczywistym oraz aktywność publikacyjną doktoranta wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgra inż. Andrzeja Wojtulewicz. Praca jest merytorycznie poprawna, założone cele zostały zrealizowane, a osiągnięcia zostały udokumentowane, natomiast występujące drobne uchybienia czy wymagane dopowiedzenia nie podważają wartości merytorycznej rozprawy.

Recenzent

  
Dr hab. inż. Adam Krzysztof Piłat, prof. uczelni

**Dr hab. inż. Adam Krzysztof Piłat, prof. uczelni**

**Akademia Górniczo-Hutnicza im Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
Katedra Automatyki i Robotyki**

Kierownik laboratoriów: robotyki, fotowoltaiki i lewitacji magnetycznej  
Al. A. Mickiewicza 30 C3-6, 30-059 Kraków,  
tel. +48 12 61734844, fax +48 12 6341568  
e-mail: ap@agh.edu.pl, home.agh.edu.pl/~ap, www.maglev.agh.edu.pl

