

**Politechnika Warszawska**  
**Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych**

DZIEKAN I RADA WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

zawiadamiają o

PUBLICZNEJ OBRONIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**mgr. inż. Andrzeja Wojtulewicza**

która odbędzie się w trybie zdalnym w dniu 30 września 2020 r. o godz. 10.00

Tytuł rozprawy doktorskiej: „Projektowanie systemów sterujących wykorzystujących algorytmy regulacji predykcyjnej i struktury FPGA”

promotor: dr hab. inż. Maciej Ławryńczuk, prof. uczelni, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych Politechnika Warszawska

recenzenci: dr hab. inż. Adam Piłat, prof. uczelni Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademia Górniczo-Hutnicza

dr hab. inż. Grzegorz Mzyk, prof. uczelni Wydział Elektroniki Politechnika Wroclawska

Na stronie internetowej wydziału [www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje](http://www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje) znajdują się streszczenie rozprawy oraz recenzje, jak również dostęp do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Z treścią rozprawy można zapoznać się na stronie internetowej:

Sposób uczestniczenia w publicznej obronie:

[https://teams.microsoft.com/l/meetup-join/19%3ameeting\\_NzYxMThiZTctOTE0OS00MmVjLThjZWYtZDFINmJiZjNjODA4%40thread.v2/0?context=%7b%22Tid%22%3a%223b50229c-cd78-4588-9bcf-97b7629e2f0f%22%2c%22Oid%22%3a%229cc3079e-69ac-4af0-adf0-42e0669c0582%22%7d](https://teams.microsoft.com/l/meetup-join/19%3ameeting_NzYxMThiZTctOTE0OS00MmVjLThjZWYtZDFINmJiZjNjODA4%40thread.v2/0?context=%7b%22Tid%22%3a%223b50229c-cd78-4588-9bcf-97b7629e2f0f%22%2c%22Oid%22%3a%229cc3079e-69ac-4af0-adf0-42e0669c0582%22%7d)

Praca doktorska jest udostępniona pod linkiem:

[https://wutwaw-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/maciej\\_lawrynczuk\\_pw\\_edu\\_pl/EfhFAaEZtyJDtYUvsd3REUwBlfZcNP-km4gGw7lL7jJzfw?e=OQT2b1](https://wutwaw-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/maciej_lawrynczuk_pw_edu_pl/EfhFAaEZtyJDtYUvsd3REUwBlfZcNP-km4gGw7lL7jJzfw?e=OQT2b1)

Dziekan



prof. dr hab. inż. Michał Malinowski

**Rodzaj pracy: rozprawa doktorska**

**Mgr inż. Andrzej Wojtulewicz**

**Promotor - dr hab. inż. Maciej Ławryńczuk, prof. uczelni Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych Politechnika Warszawska**

**Tytuł rozprawy doktorskiej:” Projektowanie systemów sterujących wykorzystujących algorytmy regulacji predykcyjnej i struktury FPGA**

## **Streszczenie**

Algorytmy regulacji predykcyjnej (ang. Model Predictive Control, MPC) są często stosowane w przemysłowych systemach automatyki zaawansowanej, np. w przemyśle chemicznym, petrochemicznym, spożywczym i papierniczym. Przykładowe procesy to reaktory chemiczne oraz kolumny destylacyjne. Cechą szczególną takich procesów jest dość wolna dynamika, co oznacza, że okres próbkowania algorytmu regulacji jest rzędu sekund lub nawet minut. Do implementacji stosuje się programowalne sterowniki logiczne lub sterowniki przemysłowe. Rozwój elektroniki, dostępność szybkich i tanich mikrokontrolerów, umożliwia zastosowanie zaawansowanych algorytmów regulacji do szybkich procesów, charakteryzujących się krótkimi okresami próbkowania, rzędu ułamków sekund, dziesiątek milisekund lub nawet pojedynczych milisekund. Przykładowe zastosowania to sterowanie silnikami elektrycznymi i spalinowymi, sterowanie pojazdami autonomicznymi, sterowanie bezzałogowymi statkami powietrznymi i pływającymi.

Przedmiotem rozprawy jest programowanie systemów sterujących wykorzystujących algorytmy regulacji predykcyjnej oraz bezpośrednio programowalne macierze bramek układów (ang. Field Programmable Gate Arrays, FPGA), które do tej pory są znacznie mniej popularne jako platformy obliczeniowe automatyki niż mikrokontrolery. Zaproponowano spójną metodykę projektowania systemów sterujących wykorzystujących algorytmy regulacji predykcyjnej i układy FPGA, które umożliwiają sterowanie szybkich systemów dynamicznych, charakteryzujących się krótkimi okresami próbkowania. Proponowane podejście składa się z warstwy sprzętowej (projekt układów elektronicznych) oraz programowej (implementacja algorytmów), które są ze sobą ściśle związane. Praca podzielona jest na dziewięć rozdziałów. Pierwszy rozdział jest wprowadzeniem, zdefiniowano obszar badawczy, cel, tezę i zakres rozprawy. W drugim rozdziale krótko opisano wykorzystywane algorytmy regulacji predykcyjnej: algorytm Dynamic Matrix Control (DMC) oraz Generalized Predictive Control (GPC), oba w wersji analitycznej oraz numerycznej. W trzecim rozdziale zdefiniowano wymagania stawiane algorytmom regulacji stosowanym w systemach wbudowanych, a następnie omówiono cechy szczególne trzech platform sprzętowych, służących do implementacji algorytmów regulacji: programowalnych sterowników logicznych, sterowników przemysłowych oraz mikrokontrolerów. W czwartym rozdziale przedstawiono układy FPGA: genezę powstania, strukturę oraz programowanie. W piątym rozdziale omówiono warstwę programową opracowanego systemu do regulacji predykcyjnej: koncepcje systemu i jego ogólna strukturę, a także implementacje warstw: procesora NIOS II, VHDL oraz warstwy programowej C. W szóstym rozdziale omówiono

warstwę sprzętową opracowanego systemu, w tym przedstawiono szczegóły dotyczące zaprojektowanej płytki interfejsowej, projekt interfejsów oraz aspekty praktyczne dotyczące wykonania i uruchomienia interfejsów. W siódmym rozdziale opisano wykorzystywane procesy dynamiczne: stanowisko grzejąco-chłodzące, stanowisko świetlne oraz serwomechanizm. W ósmym rozdziale pracy przedstawiono i omówiono wyniki eksperymentów. W szczególności, zbadano wpływ rodzaju i parametrów algorytmów regulacji na jakość regulacji i czas obliczeń, koniecznych w każdej chwili próbkowania. Rozdział dziewiąty podsumowuje prace, określono możliwe kierunki rozwoju.

Słowa kluczowe: regulacja zaawansowana, algorytmy regulacji predykcyjnej (MPC), bezpośrednio programowalne macierze bramek układów (FPGA)

# Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Wojtulewicza pt. "Projektowanie systemów sterujących wykorzystujących algorytmy regulacji predykcyjnej i struktury FPGA"

dr hab. inż. Grzegorz Mzyk, prof. uczelni  
Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

2 czerwca 2020 roku

## 1 Tematyka rozprawy, obszar badań

Tematyka rozprawy wiąże się z tzw. sterowaniem predykcyjnym. Jest ono oparte na prognozowaniu zachowania się obiektu dynamicznego w najbliższej przyszłości i zastosowaniu tej prognozy w podejmowaniu decyzji o sterowaniu. Prognozowanie i optymalizacja sterowania są wykonywane w czasie rzeczywistym, tj. na bieżąco. Podejście takie ma przewagę nad tradycyjną regulacją *PID* bazującą jedynie na wartości uchybu w chwili obecnej i wcześniejszych. Istotne jest to, aby tempo obliczeń było odpowiednio szybkie, tzn. aby wyliczenie wartości sterowania nastąpiło w ciągu pojedynczego kroku próbkowania. W wielu zastosowaniach, dla szybko zmieniających się sygnałów są to okresy rzędu milisekund. Sytuację dodatkowo komplikuje złożona struktura obiektu – jego wielowymiarowość, niestacjonarność (zmiana parametrów w czasie), lub występowanie nieliniowości.

Praca ma charakter interdyscyplinarny, a jej tematyka lokuje się w zakresie szeroko rozumianej automatyki (optymalne sterowanie i podejmowanie decyzji). Ograniczono się do klasy systemów liniowych o wielu wejściach i wielu wyjściach (*MIMO*). Skoncentrowano się na dwóch popularnych algorytmach: *DMC*, opartego na predykcji nieparametrycznej za pomocą odpowiedzi skokowej oraz *GPC*, zakładającego znajomość rzędu (postaci) równania różnicowego opisującego obiekt.

Temat badań jest bardzo nowoczesny. Dzięki szybkiemu rozwojowi technologii półprzewodnikowej w ostatniej dekadzie stało się możliwe zaaplikowanie złożonych procedur obliczeniowych w wielu dziedzinach, w których do tej pory nie było to możliwe. Szybkie procesory i bramki programowalne *FPGA* pozwalają na efektywne projektowanie systemów wbudowanych (mechatronika), sterowanie kompleksami operacji w organizacji produkcji i logistyce.

Kluczowym zagadnieniem jest tutaj możliwość dekomponowania problemu na mniejsze oraz taki sposób programowania obliczeń, który umożliwia ich równoległość. Prowadzi to do znaczącego przyspieszenia działania, co poszerza zakres obecnych zastosowań i może mieć duże znaczenie w wymiarze komercyjnym, ekologicznym, militarnym.

## 2 Struktura i zawartość rozprawy

Struktura pracy jest następująca:

*Rozdział 1.* Wstęp. Sformułowanie celu i zakresu rozprawy. Ogólne przedstawienie istoty rozpatrywanego problemu, tj. zagadnienia sterowania predykcyjnego wielowymiarowymi systemami liniowymi i jego implementacji komputerowej.

*Rozdział 2.* Wprowadzenie do regulacji predykcyjnej *MPC*, na tle klasycznej koncepcji regulatorów *PID*. Przegląd literatury. Sformułowanie problemu i wprowadzenie odpowiednich oznaczeń. Opis działania znanych z literatury algorytmów *DMC* i *GPC*. Przedstawienie ich zalet i wad, a także dokonanie analizy porównawczej.

*Rozdział 3.* Przegląd istniejących rozwiązań implementacyjnych, takich jak: sterowniki programowalne *PLC*, sterowniki przemysłowe i mikrokontrolery. Omówienie ich zakresu stosowalności, wad i zalet, stosowanych standardów, porównanie parametrów czasowych i prądowych, odporności na zakłócenia.

*Rozdział 4.* Przedstawienie genezy powstania układów *FPGA*. Rys historyczny – od wynalezienia tranzystora i zastosowania logiki dwustanowej, do rozwiązań współczesnych. Omówienie struktury układów *FPGA* i metodologii ich programowania.

*Rozdział 5.* Przedstawienie oryginalnej (autorskiej) implementacji opisanych wcześniej rozwiązań w technologii *FPGA* z użyciem języka *VHDL*. Opracowanie algorytmu z akceleracją obliczeń.

*Rozdział 6.* Opis techniczny (dokumentacja techniczna) konkretnej płyty z modułem *FPGA*, na której wykonano projekt.

*Rozdział 7.* Opis trzech stanowisk testowych/laboratoryjnych (wymiana ciepła, sterowanie światłem, serwomechanizm) samodzielnie wykonanych i oprogramowanych przez autora.

*Rozdział 8.* Prezentacja wyników eksperymentów przeprowadzonych na stworzonych stanowiskach.

Rozprawa kończy się sekcją 'Podsumowanie i wnioski'.

Rozdziały 2.-4. oraz 6. mają charakter przeglądowy. Zasadniczy, w kontekście oryginalnego wkładu autora jest Rodział 5. (jeśli chodzi o aspekt naukowy) oraz Rozdziały 7. i 8. (jeśli chodzi o wymiar praktyczny).

## 3 Oryginalne osiągnięcia autora

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć autora zaliczam:

- Akcelerację obliczeń w implementacji algorytmów *DMC* i *GPC* w technologii *FPGA*. Równoległe obliczenia umożliwiły znaczne przyspieszenie działania metody optymalizującej kryterium sterowania. Dzięki temu możliwe stało się rozszerzenie zakresu stosowalności techniki



*MPC* w sterowaniu szybkozmiennych procesów (o krótkich okresach próbkowania, rzędu *ms*, i szybkiej zmienności sygnałów).

- Opracowanie spójnej metodologii projektowania, implementacji i testowania układu sterowania predykcyjnego na platformie *FPGA*.
- Samodzielne wykonanie trzech zaawansowanych stanowisk laboratoryjnych, co wymagało szerokiej wiedzy z zakresu zarówno teorii sterowania, jak i budowy układów elektronicznych oraz ich programowania.
- Przedstawienie obecnych rozwiązań w sposób usystematyzowany, kompletny, jednolity i przejrzysty, co samo w sobie nie jest osiągnięciem naukowym, jednak wymaga wiedzy eksperckiej. Szeroki przegląd literatury w zakresie zarówno teorii jak i zastosowań, ze szczegółowym omówieniem proponowanych rozwiązań, analizą krytyczną i porównawczą. Lista referencji jest szeroka, kompletna i aktualna (zawiera 128 pozycji). Obejmuje ona zarówno prace o charakterze teoretycznym, jak praktycznym.

## 4 Aspekty pozytywne zasługujące na podkreślenie

Na szczególne podkreślenie zasługują następujące aspekty pozytywne:

- rozprawa łączy zaawansowaną teorię z praktyką, co jest szczególnie istotne z punktu widzenia potrzeb nowoczesnego przemysłu
- rozprawa doktorska świadczy o bardzo dużym wkładzie pracy autora w zakresie studiów literaturowych, konstruowania urządzeń mikroprocesorowych i ich programowania
- mocną stroną pracy jest też język, pomimo złożoności problemów autor z powodzeniem przedstawia je w sposób przystępny i prosty
- ogólne wnioski podsumowujące są przedstawione starannie i szeroko uargumentowane
- stworzone stanowiska testowe są używane przez studentów w ramach zajęć dydaktycznych

## 5 Uwagi krytyczne, komentarze, rekomendacje

### 5.1 Uwagi ogólne (o charakterze merytorycznym)

1. Wkład naukowy autora, w przeciwieństwie do wkładu praktycznego nie jest wystarczająco wyraźnie wyeksponowany. Rozprawa jest obszerna, a większość rozdziałów ma charakter przeglądowy, tzn. opisujący rzeczywistość. Oryginalne wyniki pojawiają się w Rozdziale 5,

nie są one jednak opisane obszernie i szczegółowo (np. str. 85), biorąc pod uwagę objętościową proporcję w stosunku do fragmentów przeglądowych i dokumentacji technicznych. Pewien niedosyt budzi też fakt, że korzyści płynące z akceleracji są opisane jedynie słownie i pokazane w eksperymentach. Powyższa uwaga krytyczna nie odnosi się do faktu umieszczenia w rozprawie szerokiego wprowadzenia, a jedynie do niezachowania proporcji objętościowych właściwych dla rozprawy doktorskiej.

2. W pracy ograniczono się do obiektów liniowych. Przepuszczalną przyczyną tego ograniczenia jest specyficzne/konkretne przyjęte kryterium jakości sterowania i konieczność zagwarantowania wypukłości optymalizowanej funkcji kryterialnej. Wydaje się zatem, że bezproblemowe jest uogólnienie proponowanego podejścia na klasę systemów liniowych ze względu na parametry, a niekoniecznie liniowych (np. systemy typu Hammersteina). Niezależnie od tego można też dokonać próby uogólnienia metody na obiekty niestacjonarne (z parametrami zmieniającymi się w czasie).
3. Uzyskane w pracy przyspieszenie obliczeń ma charakter jedynie algorytmiczny. Ciekawym byłoby zastanowienie się nad dekompozycją samego zadania optymalizacji wielowymiarowej. Intuicja podpowiada, że dla pewnych klas zadań można spodziewać się znaczących zysków obliczeniowych. Potraktowanie tego zagadnienia jako spoza zakresu pracy (autor porusza tę kwestię na str. 67) budzi pewien niedosyt w świetle wyników badań nad algorytmami dekompozycji i koordynacji w zadaniach optymalizacji z ograniczeniami, prowadzonych np. przez zespół prof. W. Findeisena.
4. Nazwy 'numeryczny' i 'analityczny' stosowane dla algorytmów nie są szczęśliwe, mimo że zaczerpnięte z literatury. Nie oddają one istoty różnicy między podejściami. Warto też wspomnieć, że zastosowanie modelu w postaci równania różnicowego skutkuje redukcją liczby parametrów modelu, ale dzieje się to kosztem ryzyka błędnej parametryzacji, co prowadzi do ewentualnego systematycznego błędu aproksymacji.

## 5.2 Uwagi szczegółowe (o charakterze technicznym)

Poniższe uwagi mają charakter techniczny i w żadnym stopniu nie umniejszają wysokiej oceny merytorycznej rozprawy.

1. Brak indeksu oznaczeń. Pomimo, że symbole są używane w sposób konsekwentny i zdyscyplinowany, indeks oznaczeń byłby ułatwieniem dla czytelnika.

2. W wielu miejscach zamiast słowa 'wykorzystywane' bardziej odpowiednie byłoby określenie 'stosowane', lub 'użyte'.
3. Brak indeksu czasu w oznaczeniach sygnałów na str. 16.
4. Na Rys 2.1 brak jest strzałek od sterowań  $u$  do bloku regulatora. Są one wskazane, gdyż blok ten korzysta z przeszłych wartości pomiarów wejścia obiektu.
5. Zdarzają się nieprecyzyjne sformułowania, np. wzór  $s_k^{m,n} = s_D^{m,n}$  na stronie 22. Chodzi o własność asymptotyczną, dla której dysponujemy odpowiednimi formalizmami matematycznymi.
6. Warto byłoby przy omawianiu wzoru (2.43) użyć nazwy metody, czyli 'ważone najmniejsze kwadraty'.
7. Na stronie 28 wskazane byłoby wyjaśnienie dlaczego macierz  $A$  jest diagonalna i czy takie założenie nie zawęży klasy rozpatrywanych obiektów, tym bardziej że w dalszej części pracy wspomina się o sprzężeniach skrośnych.
8. Na stronie 28 używa się raz symbolu  $z^{-1}$ , a innym razem  $q^{-1}$ .
9. Niektóre sformułowania są nieprecyzyjne/potoczne, np. czytamy: 'wektor prognozowany sygnałów wyjściowych będzie równy ... oraz ...', gdy chodzi o sumę.
10. Podobnie, często stosowane sformułowanie 'wpływ przeszłości' jest nieprecyzyjne. Należałoby raczej zamieścić wzór przedstawiający co autor ma na myśli.
11. We wzorach wyśrodkowanych brak jest znaków interpunkcyjnych.
12. Zamiennie używa się terminów równanie/wzór, podczas gdy nie są one równoznaczne.
13. Czy w komentarzu na stronie 33 znajomość modelu zakłóceń jest konieczna, czy wystarczające będą ogólne założenia dotyczące wartości oczekiwanej i wariancji?
14. Drobne błędy techniczne i językowe (nieliczne), np. 'konieczne w systemów' (str. 51), puste 'światło' na str. 83.
15. Brak porównań wyników eksperymentów z tradycyjnymi regulatorami typu  $PID$  w Rozdziale 8.
16. Nie jest jasne dlaczego charakterystyki statyczne zaprezentowane na Rys. 8.11 nie mają charakteru liniowego.



## 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 inżynierijno-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



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział EAIiB

Katedra Automatyki i Robotyki

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





AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział EAIiB

Katedra Automatyki i Robotyki

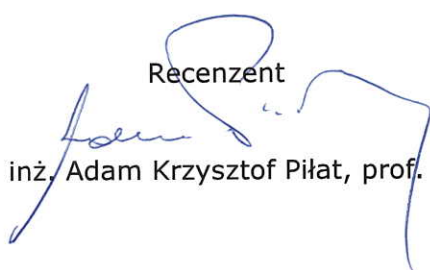
Kraków, dn. 30.06.2020r.

**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

