

WPLYNĘŁO

dn. 08 CZE. 2020

# Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Wojtulwicza 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 predykcijnego 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 Rozdział 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 predycyjnego 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*