

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Macieja Wasilewskiego
pt. *Adaptive stabilization algorithms for engineering systems subjected
to change of structural parameters and excitation*

opracowana na zlecenie
Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki
PAN w Warszawie

1. Obszar problemowy

Dynamiczny rozwój możliwości technicznych oraz teoretycznych sterowania układami inżynierskimi podawanymi zmianom parametrów i zewnętrznym wymuszeniom stawiają coraz to nowe wymagania przed projektantami układów sterowania celem zapewnienia większej stabilności przed ich uszkodzeniem i destrukcją. Opiniowana rozprawa jest udaną próbą opracowania takich adaptacyjnych metod i algorytmów sterowania złożonymi układami inżynierskimi np. takimi jak budynek poddany trzęsieniu ziemi czy most wzbudzony przez przejazd kolumny samochodów. Sformułowana na 11. stronie rozbudowana teza rozprawy we właściwy sposób stawia cele i zadania badawcze podlegające opracowaniu.

Na podstawie przeglądu literatury oraz analizy ogólnego problemu sterowania optymalnego dla układów skupionych poddanych zakłóceniom wykazano, że sterowanie optymalne jest niemożliwe do wyznaczenia w praktyce, gdy przyszły przebieg zakłócenia jest nieznanym ale obserwowalnym/mierzalnym. Aby rozwiązać ten problem zaproponowano ogólną adaptacyjną metodę sterowania z wykorzystaniem sukcesywnej aproksymacji zakłóconego układu przez modele dynamiczne, które są niezmiennie w czasie. Rozpatrywano dwa przypadki – stabilizację układów poddanych działaniu zewnętrznego wymuszenia np. trzęsienia ziemi oraz stabilizację układów poddanych nagłym zmianom parametrów wewnętrznych np. sztywność połączeń czy masy elementów konstrukcji. W pierwszym przypadku zaproponowano zarówno sterowanie aktywne jak i półaktywne, które jest bliskie optymalnemu sterowaniu

przełączeniowemu. Z kolei w przypadku nagłych zmian parametrów zaproponowano sterowanie aktywne pozwalające na wykrywanie nagłej zmiany parametrów np. konstrukcji budynku przez chwilowy pomiar stanu i wartości zadanego funkcjonału celu. Wszystkie zaproponowane rozwiązania teoretyczne dotyczące metod i algorytmów sterowania adaptacyjnego zostały zweryfikowane numerycznie poprzez symulacje praktycznych problemów stabilizacji czterech procesów i obiektów technicznych takich jak maszyna wiertnicza poddana zmianom tarcia, wysoki budynek poddany trzęsieniu ziemi, belka wzbudzona przez ruchome obciążenie czy układ oscylatorów sprzężonych z częściowym zniszczeniem sztywnego połączenia.

2. Koncepcja oraz realizacja rozprawy

Rozprawa o ogólnej objętości 142 strony opracowana jest w języku angielskim z jednostronicowym streszczeniem w języku polskim i składa się z rozszerzonego wstępu, trzech rozdziałów, krótkiego 2-stronicowego podsumowania oraz dodatku. Załączony wykaz cytowanej literatury zawiera 118 pozycji, które raczej dobrze odzwierciedlają stan badań w zakresie tematyki rozprawy jakie są prowadzone w kraju i na świecie. Zauważalny jest jednak brak znanych monografii ze sterowania predykcyjnego np. Tatjewski Piotr – *Advanced Control of Industrial Processes. Structures and Algorithms* - Springer 2007 lub sterowania w warunkach uszkodzeń np. Blanke Mogens i in. - *Diagnosis and Fault Tolerant Control* – Springer, 2006. Ogólnie przyjęta struktura rozprawy jest poprawna, a poszczególne rozdziały są merytorycznie uzasadnione i stanowią logiczną całość.

Ogólnie rozprawa składa się z trzech rozdziałów teoretycznych i są to rozdziały drugi, trzeci i czwarty oraz rozdziału piątego ilustrującego efektywność zaproponowanych rozwiązań dla czterech różnych zagadnień praktycznych. Rozdział drugi jest poświęcony ogólnemu problemowi sterowania procesami opisanymi równaniami różniczkowymi zwyczajnymi i może być traktowany jako rozszerzone wprowadzenie do tematyki rozprawy z bardzo dobrym umotywowaniem zaproponowanych rozwiązań w kolejnych rozdziałach.

Rozdział trzeci dotyczy sterowania adaptacyjnego systemami mechanicznymi z zakłóceniami zewnętrznymi, przyjmując model systemu w postaci układu liniowych równań różniczkowych. Adaptacyjność rozwiązania polega na estymacji nieznanego, ale mierzalnego zakłócenia zewnętrznego z wykorzystaniem autoregresyjnej metody identyfikacji. W przypadku realizacji sterowania aktywnego rozwiązaniem sformułowanego problemu jest regulator liniowo-kwadratowy. Problem optymalizacji rozpatruje się na skończonym i nieskończonym horyzoncie czasu, przy czym realizację na nieskończonym horyzoncie czasu uzyskuje się

poprzez mniejszą złożoność obliczeniową. Z kolei rozpatrując sterowanie półaktywne zaproponowano bliskie optymalnemu sterowanie przełączeniowe poprzez rozwiązywanie odpowiedniego równania Lapunova.

Kolejny rozdział czwarty dotyczy badania stabilizacji układów mechanicznych poddanych nagłym zmianom parametrów wewnętrznych układu. Proponuje się metodę aktywnego sterowania poprzez wykrywanie nagłych zmian parametrów np. konstrukcji budynku na podstawie pomiaru stanu i wartości przyjętego funkcjonału celu. Celem sformułowanej adaptacyjnej metody sterowania jest aproksymacja parametrów przyjętego liniowego modelu procesu na podstawie pomiarów.

Ostatni rozdział piaty poświęcono w całości weryfikacji numerycznej zaproponowanych metod sterowania w rozdziałach trzecim i czwartym. Na początku rozpatruje się problem aktywnego sterowania maszyną wiertniczą poddaną zmiennemu tarcia z wykorzystaniem autoregeneracyjnej metody identyfikacji. W badaniach numerycznych brano pod uwagę różnego rodzaju tarcia a wyniki stabilizacji porównywano ze znanymi regulatorami LQR i LQG. Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości (analiza spektralna), które jednoznacznie potwierdzają poprawę jakości stabilizacji procesu wiercenia z zastosowaniem proponowanego rozwiązania w porównaniu ze znanymi metodami. W kolejnej części tego rozdziału rozpatruje się problem wibracji budynku poddanego trzęsieniu ziemi, a konkretnie konstrukcji stalowej o wymiarach 30.48m x 36.58 m x 80.77 m (wysokość). W badaniach numerycznych wykorzystano m.in. znane sygnały pobudzające konstrukcje z trzęsień ziemi w Kobe oraz w El Centro. Wyniki zastosowania zaproponowanej metody sterowania adaptacyjnego porównywano z wynikami sterowania regulatorami typu LQG i H_∞ . Pokazano, że stosując metodę autora rozprawy można uzyskać redukcję amplitudy ugięcia w istotnym stopniu w porównaniu z regulatorami typu LQG i H_∞ . Z kolei efektywność zaproponowanej półaktywnej adaptacyjnej metody sterowania pokazano na przykładzie stabilizacji belki wzbudzanej przez ruchome obciążenie. W badaniach przyjęto uproszczony model belki i przy założeniu, że na podstawie pomiaru znana jest pozycja/lokalizacja obciążenia. Ponadto przyjęto upraszczające założenie, że na każdym kroku iteracji obciążenie porusza się ze stałą prędkością. Badania numeryczne przeprowadzono dla różnych scenariuszy sygnałów pobudzających, czyli poruszania się obciążenia po belce. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów pokazano dla ugięcia belki stosując sterowanie stałe, optymalne oraz adaptacyjne. Ostatni czwarty przykład dotyczy aktywnej stabilizacji układu oscylatorów sprężonych z nagłym częściowym zniszczeniem sztywnego połączenia. W da-

nym przypadku pokazano efektywność stosowania zaproponowanej adaptacyjnej metody sterowania na tle porównania z regulatorami typu LQR. Przedstawione wyniki dotyczą zmiany sztywności systemu oraz detekcji zmiany wartości parametrów.

Na podstawie skrótowego omówienia struktury i treści rozprawy stwierdzam, że mgr. inż. Maciej Wasilewski w bardzo dobrym stopniu wykazał się umiejętnościami formułowania problemów naukowych inspirowanych zastosowaniami praktycznymi, które rozwiązał z zastosowaniem właściwych metod badawczych. Wykonanie obszer-nych badań numerycznych z wykorzystaniem kilku przykładów systemów i układów fizycznych jednoznacznie potwierdza efektywność zaproponowanych adaptacyjnych metod sterowania w problemach stabilizacji systemów i układów. Rozprawa posiada charakter teoretyczno-praktyczny, a do opisu modeli, metod i algorytmów zastosowano formalizm matematyczny właściwy na pograniczu dyscyplin *informatyka techniczna i telekomunikacja oraz automatyka, elektronika i elektrotechnika*. Ponadto wykazał się bardzo dobrą wiedzą między innymi z takich metod badawczych jak teoria sterowania, identyfikacja parametryczna, modelowanie procesów i obiektów fizycznych jak również numeryczne badania eksperymentalne.

3. Oryginalne osiągnięcia

Uzasadniając tezę badawczą i realizując przyjęty plan badań doktorant uzyskał kilka ciekawych i oryginalnych wyników naukowych potwierdzonych na drodze numerycznych badań eksperymentalnych. Pokazał możliwości opracowania kilku adaptacyjnych metod i algorytmów stabilizacji systemów i obiektów technicznych poddanych różnym zakłóceniom. Do ważnych osiągnięć naukowych mgr. inż. Macieja Wasilewskiego między innymi zaliczam następujące:

1. Opracowanie i teoretyczna analiza kilku adaptacyjnych metod sterowania w tym:
 - a) z wykorzystaniem autoregresyjnej metody identyfikacji parametrycznej na skończonych i nieskończonych horyzontach czasu do stabilizacji układów mechanicznych poddanych zakłóceniom zewnętrznym;
 - b) półaktywnej metody bazującej na teorii sterowania Lapunova oraz autoregresyjnej metody identyfikacji parametrycznej do stabilizacji układów mechanicznych poddanych zakłóceniom zewnętrznym;
 - c) aktywnej adaptacyjnej metody bazującej na schemacie iteracyjnym do stabilizacji układów mechanicznych poddanych nagłym zmianom parametrów.

2. Uzasadnienie i weryfikacja zaproponowanych metod i algorytmów adaptacyjnego sterowania procesem stabilizacji układów mechanicznych poddanych zakłóceniom na drodze obszernych numerycznych badań eksperymentalnych wybranych czterech przykładów praktycznych:

- stabilizacja budynku poddanego trzęsienia ziemi,
- stabilizacja procesu wiercenia przy zmiennym tarciu podłoża,
- stabilizacja belki wzbudzonej przez poruszające się obciążenia oraz
- stabilizacja układu oscylatorów sprzężonych z nagłym częściowym zniszczeniem sztywnego połączenia.

Przedstawione w rozprawie oryginalne wyniki naukowe potwierdzone obszernymi numerycznymi badaniami eksperymentalnymi w znacznym stopniu zostały opublikowane przez doktoranta w sześciu pracach naukowych. Jest on współautorem dwóch artykułów opublikowanych w czasopiśmie z listy JCR – *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* (2019, IF: 1.504); oraz *Automation in Construction* (2019, IF: 4.313). Ponadto jest współautorem trzech referatów wygłoszonych na międzynarodowych konferencjach: *American Control Conference* (2019), *International Conference on Computer Methods in Mechanics* (2017) oraz *International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics* (2017). Jest też współautorem jednego artykułu w czasopiśmie *Machine Dynamic Research* (2016).

Uwzględniając wymienione oryginalne wyniki badań naukowych i aplikacyjnych uważam, że mgr. inż. Maciej Wasilewski uzasadnił sformułowaną tezę badawczą i zrealizował założone cele badawcze w sposób wyróżniający.

4. Uwagi i komentarze

Ogólnie całą rozprawę oceniam bardzo dobrze pod względem merytorycznym jak i redakcyjnym. Pewne uwagi zamieszczone niżej mają charakter dyskusyjny i dotyczą zarówno zagadnień merytorycznych jak i redakcyjnych.

1. Rozpatrywane w rozprawie przykłady obiektów i systemów technicznych mają charakter przestrzenny i dynamika ich zachowania powinna być opisana modelami o parametrach rozłożonych, czyli równaniami cząstkowymi. W pracy przyjmowane są modele uproszczone tzw. modele skupione opisywane układami równań różniczkowych zwyczajnych. Czy można oszacować tzw. „straty” jakości sterowania poprzez przyjęcie takich uproszczeń? Przykładowo na str 109 analizując problem stabilizacji

belki przyjęto tylko 5 składowych/członów do aproksymacji dynamiki. Czy można oszacować straty z powodu pominięcia składowych wyższego rzędu?

2. Uwagi redakcyjne

- a) brak podsumowań rozdziału 2,3 i 4. Takie podsumowania są ważne szczególnie w rozprawach doktorskich gdyż tworzą one merytoryczno-logiczne połączenia poszczególnych rozdziałów.
- b) Wykaz literatury na ogół jest dobrze opracowany redakcyjnie, ale pewne uwagi dotyczą ujednolicenia opisu poszczególnych pozycji, np.
 - są podawane nazwiska autorów wraz z pełnymi imionami [87], ale też tylko z inicjałami imion [85],
 - tytuły artykułów w czasopismach pisane są z dużych liter [42] ale też małych [41].

5. Podsumowanie

Mając na uwadze wszystkie aspekty rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Wasilewskiego, a w szczególności odnotowane oryginalne osiągnięcia naukowe, jak również drobne uwagi o charakterze dyskusyjnym, które nie mają istotnego wpływu przy ocenie całościowej rozprawy:

- **stwierdzam, że rozprawa doktorska spełnia wymagania ustawy o stopniach i tytułach naukowych w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja,**
- **wnoszę o przyjęcie rozprawy przez Radę Naukową Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN i dopuszczenie do jej obrony.**

Wnioskuje o wyróżnienie rozprawy z uwagi na:

- **zapropozowanie metod i algorytmów adaptacyjnego sterowania procesami stabilizacji złożonymi obiektami i procesami technicznymi w warunkach zakłóceń zewnętrznych oraz nagłych zmian ich parametrów;**
- **opublikowanie wyników badań w dwóch specjalistycznych czasopismach z bazy JCR o dużych wskaźnikach oddziaływania (IF: 4.313 i IF: 1.504) oraz w materiałach prestiżowych konferencji międzynarodowych np. *American Control Conference*.**

