

**Prof. dr hab. inż. Jerzy KLAMKA**  
Członek rzeczywisty PAN  
Instytut Automatyki  
Politechnika Śląska  
ul. Akademicka 16  
44-100 Gliwice  
jerzy.klamka@polsl.pl  
kom. 798-191-701

Gliwice.17.02.2019.



### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**Pana mgr inż. Andrzeja LATOCHY**

**pt. "Sterowania procesami silnie nieliniowymi w czasie rzeczywistym"**

Niniejsza recenzja dotyczy pracy doktorskiej Pana mgr inż. Andrzeja Latochy pt. "" w dyscyplinie naukowej informatyka, której Promotorem jest Pan Prof. dr hab. inż. Witold Byrskii. Recenzję opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej im Stanisława Staszica w Krakowie Pana dr hab. inż. Ryszarda Sroki działającego na podstawie uchwały Rady Wydziału o powołaniu Recenzentów z dnia 24 stycznia 2019 roku.

W ostatnim okresie znacznie wzrosło zainteresowanie teorią sterowania nieliniowymi, ciągłymi, skończone wymiarowymi układami dynamicznymi, których dynamikę opisują nieliniowe równania różniczkowe zawierające skończoną liczbę niezależnych zmiennych stanu.

Badanie podstawowych własności nieliniowych układów dynamicznych, takich jak: sterowalność, obserwowalność oraz stabilność i stabilizowalność nasyca wiele trudności, wynikających bezpośrednio z braku analitycznej postaci rozwiązania nieliniowego równania różniczkowego stanu. W przypadku układów nieliniowych jedną z metod ich analizy jest wykorzystanie odpowiednio zaproponowanej linearyzacja układu.

W recenzowanej rozprawie doktorskiej Autor zajmuje się między innymi wykorzystaniem metod linearyzacji do sterowania układami nieliniowymi lub silnie nieliniowymi. Tak dobraną tematykę rozprawy uważam za interesującą, dającą możliwość uzyskania nowych rezultatów zarówno teoretycznych, jak i aplikacyjnych.

Opiniowana rozprawa doktorska zawiera 115 stron i składa się ze wstępu, wykazu stosowanych oznaczeń, 8 zasadniczych rozdziałów, stosunkowo obszernej bibliografii cytowanych prac zawierającej ponad 80 najnowszych pozycji literaturowych, opublikowanych w ciągu ostatnich kilkunastu lat, podsumowania, oraz dodatku o charakterze matematycznym.

Rozdział 1 mający charakter wprowadzenia do tematyki rozprawy zawiera cel pracy, oraz uzasadnienie podjętej tematyki badawczej na tle rezultatów znanych w literaturze specjalistycznej z zakresu sterowania procesami nieliniowymi. Dokonano przeglądu literatury wraz z komentarzami.

Rozdział 2 przedstawia dwie tezy rozprawy:

1. dotycząca możliwości budowy obserwatora stanu o własnościach uśredniających dla nieliniowego skończonego wymiarowego układu dynamicznego o jednym wejściu i jednym wyjściu.
2. dotycząca zaproponowania algorytmu budowy regulatora stabilizującego dla nieliniowego skończonego wymiarowego układu dynamicznego o jednym wejściu i jednym wyjściu.

Podano także możliwe obszary zastosowań obserwatora stanu oraz regulatora stabilizującego.

Rozdział 3 zawiera przegląd znanych z literatury metod sterowania. Przedstawiono aktualny stan badań w tym zakresie dla wybranych często stosowanych struktur układów sterowania. Zaprezentowano różne struktury układów sterowania z wykorzystaniem regulatorów czasowo optymalnych. Przedstawiono schematy blokowe układu kaskadowego, układu ze sprzężeniem zwrotnym w torze zakłócenia, układu ze sprzężeniem zwrotnym w torze nadążania oraz układu z modelem wewnętrznym. W dalszej części rozdziału przedstawiono w skrócie estymację parametrów przy wykorzystaniu ciągłego oraz dyskretnego filtra Kalmana. Rozdział ten opracowano w całości na podstawie badań literaturowych.

Rozdział 4 dotyczy zasadniczych rezultatów rozprawy doktorskiej i obejmuje problematykę sterowania nieliniowymi oraz silnie nieliniowymi skończonymi wymiarowymi układami dynamicznymi. W pierwszej części rozdziału przytoczono rezultaty z zakresu różnych rodzajów linearyzacji układów dynamicznych, w tym linearyzacji na podstawie wzoru Taylora oraz linearyzacji typu ARMAX. Podano uzasadnienie wprowadzenia pojęcia silnej nieliniowości. Przedstawiono przykłady zastosowań wprowadzonych pojęć oraz wyniki eksperymentów numerycznych. W szczególności i zaprezentowano modelami nieliniowymi Hammersteina-Wienera dla przypadków układów: z nieliniowością na wejściu układu, z nieliniowością na wyjściu układu oraz z nieliniowościami na wejściu i wyjściu układu. W końcowej części rozdziału przedstawiono zastosowanie obserwatora o dużym wzmocnieniu na przykładzie odpowiednio dobranego modelu matematycznego mechanicznego układu dynamicznego o charakterze oscylacyjnym.

Rozdział 5 przedstawia metody i techniki stosowane w linearyzacji oraz korekcji nieliniowych systemów dynamicznych z uszkodzeniami. Zaproponowano algorytm predykcyjny do oszacowania i wstępnej korekcji uszkodzeń oraz przedstawiono wyniki eksperymentów numerycznych. Zaproponowano rekurencyjny algorytm rekonstrukcji uszkodzonych danych a także oszacowano wartość błędu średniokwadratowego dla uszkodzonych danych.

Rozdział 6 jest w całości poświęcony projektowaniu obserwatora nieliniowego o jednym wejściu i jednym wyjściu. Zakłada się lokalną sterowalność nieliniowego obiektu sterowania w otoczeniu ustalonego punktu pracy. Zaproponowano schemat blokowy regulatora oraz przedstawiono na wykresach numeryczne wyniki przeprowadzonych symulacji.

Kolejny rozdział 7 omawia zagadnienia filtracji oraz projektowania filtrów dla układów nieliniowych z zakłóceniami. Przedstawiono rekurencyjny algorytm filtrowania wraz ze schematem blokowym oraz bezpośredni algorytm filtrowania. Omówiono problem wykorzystania estymatora jądrowego.

W rozdziale 8 podano kilkanaście przykładów zastosowań rezultatów teoretycznych podanych w rozprawie doktorskiej. Między innymi nieliniowe układy sterowania wykorzystuje się szeroko w sterowaniu silnikami spalinowymi, w systemach sterowania samolotami, kserokopiarkami, sprzętem medycznym, sprzętem gospodarstwa domowego, w zastosowaniach militarnych.

Końcowy rozdział 9 zawiera podsumowanie zasadniczych oryginalnych rezultatów rozprawy oraz propozycje dalszych badań w zakresie sterowania nieliniowymi układami dynamicznym w szczególności uogólnienie niektórych rezultatów na nieliniowe ciągłe skończone wymiarowe układy dynamiczne o wielu wejściach i wielu wyjściach (tzw. układy typu MIMO).

Zasadniczymi rezultatami rozprawy doktorskiej są:

1. Weryfikacja numeryczna oraz symulacyjna na rzeczywistym obiekcie teoretycznych rezultatów pracy.
2. Wykorzystanie wyników teoretycznych zawartych w rozprawie w układzie lewitacji magnetycznej.
3. Dokonanie analizy związków zachodzących pomiędzy lokalną sterowalnością nieliniowego skończonego wymiarowego układu dynamicznego, a statyczną macierzą sprzężenia zwrotnego.
4. Wykazanie, że w przypadku nieliniowych układów dynamicznych istotne znaczenie ma nie tylko punktowa estymacja stanu układu, lecz również trend estymat.
5. Przedstawienie algorytmu linearyzacji układów nieliniowych i silnie nieliniowych, który może być stosowany w układach opisanych funkcjami nieciągłymi oraz nieróżniczkowalnymi.

Dodatek zamieszczony na końcu pracy zawiera modele matematyczne nieliniowych układów dynamicznych wykorzystywanych do weryfikacji algorytmów proponowanych w rozprawie.

Opiniowana praca doktorska ma charakter zarówno teoretyczny z zakresu teorii sterowania jak i aplikacyjny reprezentowany przykładami zastosowań wyników teoretycznych w realnych nieliniowych systemach sterowania.

Sformułowane przez Autora we wprowadzeniu zasadnicze cele rozprawy doktorskiej zostały osiągnięte, a przedstawiona na wstępie teza rozprawy dotycząca możliwości wykorzystania obserwatorów w nieliniowych systemach sterowania w pełni dowiedziona i potwierdzona zarówno obliczeniami analitycznymi jak i odpowiednio dobranymi przykładami numerycznymi.

Autor recenzowanej pracy wykazał się dobrą znajomością wybranych zagadnień teorii sterowania nieliniowymi układami dynamicznymi. Zasadnicze rezultaty teoretyczne rozprawy są ilustrowane dobrze dobranymi przykładami numerycznymi mającymi swoje odniesienia w realnych procesach układach.

Struktura wewnętrzna pracy, stosowana terminologia i oznaczenia, kolejność poszczególnych rozdziałów oraz podrozdziałów są właściwe. Pod względem redakcyjnym praca doktorska napisana jest dość starannie tym niemniej występują usterki redakcyjne, przytoczone poniżej.

Wzory (4) oraz (5) oraz rysunek 8 dotyczą układu o wielu wejściach i wielu wyjściach (tzw. układy typu MIMO), natomiast w równaniu (12) wejście  $u(t)$  oraz wyjście  $y(t)$  są skalarnymi funkcjami a zatem równanie (12) jest równaniem różniczkowym opisującym układ typu SISO.

Równanie różniczkowe (12) wymaga ponadto założenia o  $m$ -krotnej różniczkowalności dopuszczalnego sterowania  $u(t)$ .

W lemacie 1 we wzorze (21) nie zgadzają się wymiary, a ponadto wektor jednostkowy poniżej wzoru (23) ma długość  $n$ .

Wymiary macierzy oraz wektorów we wzorach (27) oraz (28) nie zgadzają się z oznaczeniami podanymi w relacjach (29).

W pracy brak jest dokładniejszej analizy warunku sterowalności dla rzeczywistych układów dynamicznych.

W pracy brak formalnej definicji silnej nieliniowości.

W równaniu (77) wszystkie zmienne są skalarne, natomiast w zdaniu poniżej występuje wektor stanu.

Brak wyprowadzenia wzorów określających kanoniczną postać sterowalną  $A$ ,  $B$ ,  $C$  we wzorach (97), (98) na podstawie relacji (95), (96).

Usterki te nie mają zasadniczego wpływu na merytoryczną wartość pracy, tym niemniej wymagają jednak korekty.

**Podsumowując uważam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie naukowej Automatyka i robotyka wymagania odnośnej Ustawy Sejmowej i wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr inż. Andrzeja Latochy do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Komisją Doktorską Rady Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.**

Jerzy Klamka

