

Zielona Góra, 14.08.2016r.

Prof. dr hab. inż. Marcin Witczak
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych
Wydział Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki
Uniwersytet Zielonogórski
Ul. Podgórna 50
65- 246 Zielona Góra
M.Witczak@issi.uz.zgora.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgra inż. Piotra Leśniewskiego
pod tytułem

„Dyskretne ślizgowe sterowanie wybraną klasą obiektów z opóźnieniem w torze wejściowym”

opracowana na zlecenie
Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki
Politechniki Łódzkiej

I. Problem naukowy i obszar rozprawy

Problemem naukowym stanowiącym przedmiot recenzowanej rozprawy doktorskiej jest opracowanie i analiza metod sterowania ślizgowego dla klasy liniowych układów dynamicznych.

Bieżący rozwój technologiczny rodzi potrzebę konstruowania coraz bardziej wyrafinowanych technik sterowania. Niniejsze uwarunkowania przekształciły teorię sterowania ze sztuki projektowania zadowolającego działającego układu regulacji do nowoczesnej gałęzi nauki jaką jest dzisiaj. Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat zostało opracowanych wiele różnego rodzaju strategii i technik. Na szczególną uwagę zasługują: sterowanie optymalne, sterowanie predykcyjne, sterowanie adaptacyjne, sterowanie odporne oraz sterowanie ślizgowe. W ostatnich latach pojawiają się również rozwiązania hybrydowe łączące powyższe techniki. Podejścia hybrydowe dają możliwość łączenia zalet powyższych strategii przy jednoczesnej eliminacji ich wad. Zagadnienie

projektowania strategii sterowania ślizgowego jest bardzo ważnym i stale aktualnym problemem teorii sterowania. Od przełomu lat 50tych i 60tych ubiegłego stulecia, techniki sterowania ślizgowego są stale rozwijane oraz doskonalone. W literaturze pokazuje się również znaczącą liczbę przykładów ich praktycznego zastosowania pokazujących przejrzyste korzyści płynące z używania sterowania ślizgowego.

Przedstawiona rozprawa skupia się na opracowaniu reguł osiągnięcia trybu ślizgowego oraz ich praktycznym zastosowaniu dla układu logistycznego.

Celem przedstawionych badań było udowodnienie następujących tez:

- **Teza 1:** Zastosowanie zaproponowanych w rozprawie reguł osiągnięcia trybu ślizgowego do projektowania regulatorów o zmiennej strukturze umożliwiło ograniczenie wybranych sygnałów i osiągnięcie większej odporności na zakłócenia zewnętrzne i niedokładności modelu niż rozwiązania dotychczas proponowane w literaturze.
- **Teza 2:** Zaproponowane w rozprawie dyskretne regulatory ślizgowe mogą być zastosowane do generowania zamówień w systemach logistycznych. Zapewniają one pełne zaspokojenie popytu, ograniczenie zamówień i efektywne wykorzystanie przestrzeni magazynowej.

Natomiast, do najważniejszych zadań badawczych należy zaliczyć:

- Opracowanie przełączających metod osiągnięcia trybu ślizgowego dla układu nominalnego i układu poddanego zakłóceniom z zastosowaniem: standardowej reguły osiągnięcia trybu ślizgowego, reguły osiągnięcia trybu ślizgowego zawierającej funkcję $\arctg(\cdot)$ oraz reguły osiągnięcia trybu ślizgowego zawierającej funkcję $\tanh(\cdot)$.
- Opracowanie nieprzełączających metod osiągnięcia trybu ślizgowego dla układu nominalnego i układu poddanego zakłóceniom z zastosowaniem: standardowej reguły osiągnięcia trybu ślizgowego, reguły osiągnięcia trybu ślizgowego zawierającej funkcję $\arctg(\cdot)$ oraz reguły osiągnięcia trybu ślizgowego zawierającej funkcję $\tanh(\cdot)$.
- Zastosowanie opracowanych przełączających i nieprzełączających reguł sterowania ślizgowego dla układu logistycznego.
- Opracowanie regulatora typu dead-beat dla układu logistycznego.
- Symulacyjna analiza efektywności funkcjonowania opracowanych przełączających i nieprzełączających reguł sterowania ślizgowego dla układu logistycznego.

Podsumowując, należy również podkreślić, że rezultatem praktycznym pracy jest również aplikacja pozwalająca na weryfikację opracowanych reguł osiągnięcia trybu ślizgowego.

II. Koncepcja i struktura rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera 7 rozdziałów oraz bibliografię. Podstawę pracy stanowią rozdziały od 3'ego do 6'tego, które prezentują oryginalne wyniki naukowe Doktoranta w zakresie projektowania przełączających i nieprzełączających reguł osiągnięcia trybu ślizgowego w rozważanych układach sterowania. Oryginalne wyniki pracy naukowej doktoranta dotyczą również zastosowania opracowanych metod i technik sterowania dla układu logistycznego.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy, prezentuje podstawowe cele i zakres pracy. Obejmuje także podstawowe definicje, zastosowania oraz motywacje podjęcia tematu przez Autora. Rozdział przedstawia również obszerny przegląd stanu wiedzy w zakresie sterowania ślizgowego. Doktorant w bardzo interesujący i staranny sposób przedstawia szerokie spektrum metod sterowania ślizgowego, analizując ich wady i zalety. Wynikiem przeprowadzonej analizy są problemy badawcze, które autor definiuje w **rozdziale 2**. Doktorant podsumowuje prezentowane zagadnienia w postaci dwóch tez. Jedna z nich posiada charakter teoretyczny i dotyczy opracowania nowatorskich metod sterowania ślizgowego ograniczającego wpływ niepewności modelu i zakłóceń oddziałujących na sterowany system. Druga z tez ma charakter czysto praktyczny i dotyczy zastosowania proponowanych rozwiązań dla układu logistycznego przy spełnieniu ograniczeń związanych z pełnym zaspokojeniem popytu, zamówieniami i efektywnym wykorzystaniem przestrzeni magazynowej.

Rozdział 3 dotyczy opracowania przełączających metod osiągnięcia trybu ślizgowego dla układu nominalnego i układu poddanego zakłóceniom. W szczególności, Doktorant proponuje rozwiązania bazujące na standardowej regule osiągnięcia trybu ślizgowego, a następnie proponuje rozwiązanie alternatywne z reguły osiągnięcia trybu ślizgowego zawierającej funkcję $\arctg(\cdot)$ oraz reguły osiągnięcia trybu ślizgowego zawierającej funkcję $\tanh(\cdot)$.

Rozdział 4 ma identyczną strukturę jak rozdział 3 ale dotyczy opracowania nieprzełączających metod osiągnięcia trybu ślizgowego dla układu nominalnego i układu poddanego zakłóceniom. W szczególności, Doktorant proponuje rozwiązania bazujące na standardowej regule osiągnięcia trybu ślizgowego, a następnie proponuje rozwiązanie alternatywne z reguły osiągnięcia trybu ślizgowego zawierającej funkcję $\arctg(\cdot)$ oraz reguły osiągnięcia trybu ślizgowego zawierającej funkcję $\tanh(\cdot)$.

Rozdział 5 wprowadza strukturę układu logistycznego opisanego w dziedzinie czasu dyskretnego. Autor starannie opisuje wszystkie zmienne systemowe oraz definiuje ograniczenie występujące w systemie. W dalszej części rozdziału, doktorant przedstawia metodę projektowania regulatora ślizgowego typu dead-beat. W szczególności, przedstawia on warunki stabilności układu logistycznego w warunkach bez zakłóceń. Dowodzi on również (Twierdzenie 19), że zastosowanie proponowanej strategii sterowania ślizgowego gwarantuje spełnienie ograniczeń sygnału sterującego. Podobne tezy dowodzone są dla sygnału wyjściowego reprezentującego ilość towaru w magazynie. W dalszej części rozdziału, Doktorant przeprowadza podobne rozważania ale dla rozwiązań opracowanych w rozdziałach 4 i 5.

Rozdział 6 przedstawia wyniki symulacji komputerowych obrazujących rozwiązania teoretyczne zaproponowane w rozdziale 5. Otrzymane rezultaty w jednoznaczny sposób pokazują efektywność zaproponowanych rozwiązań.

Rozdział 7 zawiera podsumowanie oraz ewentualne kierunki dalszych prac. **Wykaz bibliograficzny** obejmuje 152 pozycje, które bardzo dobrze odzwierciedlają istniejący stan wiedzy.

III. Oryginalne osiągnięcia i znaczenie poznawcze

Przedmiotem pracy badawczej było zaproponowanie nowatorskich metod doboru reguł osiągnięcia trybu ślizgowego dla układów sterowania ślizgowego. Zgodnie z zaprezentowanym w pracy, obecnym stanem wiedzy, w rozważanym obszarze badawczym nie rozpatrywano dotychczas tak sformułowanych metod sterowania. Autor zauważył i przeanalizowała szereg interesujących aspektów problemu, które były pomijane lub stanowiły marginalny element w innych opracowaniach. Stąd też konieczne okazało się rozwiązanie wielu cząstkowych zadań. Do najważniejszych osiągnięć rozprawy można zaliczyć:

- Opracowanie przełączających metod osiągnięcia trybu ślizgowego dla układu nominalnego i układu poddanego zakłóceniom z zastosowaniem: standardowej reguły osiągnięcia trybu ślizgowego, reguły osiągnięcia trybu ślizgowego zawierającej funkcję $\arctg(\cdot)$ oraz reguły osiągnięcia trybu ślizgowego zawierającej funkcję $\tanh(\cdot)$.
- Opracowanie nieprzełączających metod osiągnięcia trybu ślizgowego dla układu nominalnego i układu poddanego zakłóceniom z zastosowaniem: standardowej reguły osiągnięcia trybu ślizgowego, reguły osiągnięcia trybu ślizgowego zawierającej funkcję $\arctg(\cdot)$ oraz reguły osiągnięcia trybu ślizgowego zawierającej funkcję $\tanh(\cdot)$.
- Zastosowanie opracowanych przełączających i nieprzełączających reguł sterowania ślizgowego dla układu logistycznego.
- Opracowanie regulatora typu dead-beat dla układu logistycznego.
- Symulacyjna analiza efektywności funkcjonowania opracowanych przełączających i nieprzełączających reguł sterowania ślizgowego dla układu logistycznego.

Zaproponowane metody umożliwiają rozwiązanie problemów sterowania, dla których istniejące w literaturze rozwiązania nie dają zadowalających rezultatów. Świadczy to jednoznacznie o osiągnięciu przez Autora celu postawionego we wstępnej części pracy, zdefiniowanego w postaci Tezy 1 i 2.

Dorobek naukowy autora rozprawy obejmuje 26 publikacji, w tym 6 artykułów w czasopiśmie JCR:

- IEEE Transactions on Automation Science and Engineering (35 pkt., lista A);
- IEEE Transactions on Control Systems Technology (40 pkt., lista A);
- IET Control Theory & Applications (35 pkt., lista A);
- International Journal of Applied Mathematics and Computer Science (25 pkt., lista A);
- Mathematical Problems in Engineering (25 pkt., lista A);
- Journal of Control Engineering and Applied Informatics (15 pkt., lista A);

artykuł w Journal of Applied Computer Science Methods (4 pkt., lista B) oraz Cybernetics and Information Technologies. Doktorant był również współautorem 15 publikacji w materiałach międzynarodowych konferencji naukowych takich jak:

- Conference on Decision and Control;
- European Control Conference;

- World Congress of the International Federation of Automatic Control;
 - International Carpathian Control Conference;
 - International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics;
 - Workshop on Advanced Control and Diagnosis;
 - Conference on Diagnostics of Processes and Systems;
 - International Conference on System Theory, Control and Computing;
 - International Workshop on Variable Structure Systems;
 - European Conference on Mathematics for Industry;
 - International Workshop on Recent Advances in Sliding Modes;
- oraz trzech rozdziałów w książkach:
- Advances in Intelligent Systems and Computing;
 - Studies in Systems, Decision and Control;
 - Variable-Structure Approaches: Analysis, Simulation, Robust Control and Estimation of Uncertain Dynamic Processes.

Uwzględniając wymienione osiągnięcia naukowo-badawcze oraz fakt ich opublikowania w wyżej wymienionych pozycjach, uważam że mgr inż. Piotr Leśniewski zrealizował cel rozprawy, udowodnił postawione tezy oraz wykazał się wiedzą i umiejętnością samodzielnego rozwiązywania trudnych problemów teoretycznych i praktycznych szeroko rozumianej współczesnej automatyki i robotyki w zakresie teorii sterowania.

IV. Uwagi i komentarze dotyczące rozprawy

Uwagi ogólne:

1. Autor rozważa zagadnienia projektowania układów sterowania ślizgowego dla układów liniowych opisanych w przestrzeni stanów równaniem (13). Ogranicza ono znacząco spektrum możliwych zastosowań sterowania ślizgowego do układów o jednym wejściu. Pomimo niewątpliwiej oryginalności zaproponowanych rozwiązań, analiza możliwości ich zastosowania w kontekście układów o wielu wejściach jest zagadnieniem bardzo istotnym. Jest to szczególnie istotne w kontekście rozwiązań dla tego typu układów, które były prezentowane w literaturze na przestrzeni ostatnich lat.
2. W rozwiązaniach zaproponowanych w rozdziale 3 i 4, doktorant koncentruje się na uzyskaniu odpowiedniego charakteru trybu ślizgowego w warunkach nominalnych i z zakłóceniami. Przy projektowaniu klasycznych regulatorów, cechą charakterystyczną jest uzyskanie asymptotycznej stabilności układu w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego w warunkach nominalnych, tzn. przy braku zakłóceń. Autor przedstawia powyższe rozważania jedynie w przypadku układu logistycznego (równania (133)-(136)). Niewątpliwie praca zyskałaby na charakterze poznawczym, gdyby autor przedstawił powyższą analizę dla rozwiązań zaproponowanych w rozdziałach 3 i 4.
3. W pracy brak jest rozważań dotyczących stabilności układu sterowania ślizgowego w przypadku występowania zakłóceń. Autor koncentruje się wyłącznie na otrzymaniu

odpowiedniego trybu ślizgowego w przypadku ich występowania. Analiza opisana równaniami (133)-(136) jest w tym przypadku niewystarczająca. W celu przeprowadzenia odpowiednich rozważań możliwe jest zastosowanie rozwiązań używanych w projektowaniu układów sterowania odpornego lub, tzw. teorii kwadratowej ograniczoności (ang. quadratic boundedness).

4. W algorytmach prezentowanych w rozdziałach 3 i 4 autor pomija fakt występowania ograniczeń zmiennych stanu/wyjścia i sterujących. Analiza tego zagadnienia przedstawiona jest jedynie w kontekście układu logistycznego (Rozdział 5). Niewątpliwie praca zyskałaby na charakterze poznawczym, gdyby autor przedstawił powyższą analizę dla rozwiązań zaproponowanych w rozdziałach 3 i 4.
5. Doktorant prezentuje rozwiązania umożliwiające uwzględnienie wpływu zakłóceń przy projektowaniu układów sterowania ślizgowego. Brakuje jednak analizy wpływu zakłóceń na układ sterownia, np. czy ich wpływ jest w jakiś sposób minimalizowany.

Uwagi szczegółowe:

- Spis symboli i skrótów ułatwiłby lekturę i analizę treści rozprawy.

V. Podsumowanie recenzji

Reasumując, podniesione wyżej uwagi krytyczne i komentarze nie wpływają jednak na wysoką ocenę oryginalnych i opublikowanych osiągnięć naukowo-badawczych, zasadniczych wyników zawartych w recenzowanej pracy oraz jej ogólną pozytywną ocenę, która wyraźnie wykracza ponad poziom przeciętny.

Przedstawione wyniki stanowią niewątpliwie rozwiązanie istotnego problemu naukowego, a także dobrze świadczą o erudycji Doktoranta w zakresie teorii sterowania. Stwierdzam zatem, że przedstawiona przez magistra inżyniera Piotra Leśniewskiego rozprawa spełnia warunki określone w artykułach 13 ust. 1 i ust. 2 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku i wnioskuję o dopuszczenie go do publicznej obrony.

Stwierdzam również, że biorąc pod uwagę osiągnięcia autora przedstawione w dysertacji, jak również związany z nią ciąg publikacji, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgra Leśniewskiego.

