

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Leśniewskiego  
pt. *„Dyskretne ślizgowe sterowanie wybraną klasą obiektów  
z opóźnieniem w torze wejściowym”*

Recenzję wykonano na prośbę Prodziekana Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej, prof. Andrzeja Bartoszewicza, wyrażoną w piśmie z dnia 15 czerwca 2016 r.

### I. OBSZAR PROBLEMOWY ROZPRAWY

Zakres tematyczny recenzowanej rozprawy doktorskiej jest dobrze określony w obszarze teorii sterowania. Rozwijane od wielu lat sterowanie ślizgowe nie będąc wprowadzonym nowym zagadnieniem w teorii sterowania, jest ciągle aktualne zarówno ze względu na nowe wyzwania metodologiczne jak i z powodu wielu ciekawych i ważnych zastosowań praktycznych zarówno tych tradycyjnych, np. sterowanie serwomechanizmami i napędami elektrycznymi, jak i tych bardziej nowoczesnych, także wykraczających poza klasyczne obiekty techniczne. Jednym z ważnych kierunków badawczych w obszarze sterowania ślizgowego jest sterowanie dyskretne, szczególnie istotne w przypadku współczesnych regulatorów będących urządzeniami komputerowymi działającymi właśnie w czasie dyskretnym. Taki kierunek badawczy w zakresie sterowania ślizgowego został z dużym powodzeniem przed laty podjęty w ośrodku łódzkim i oceniana rozprawa doktorska jest kolejnym etapem rozwoju tej problematyki. Kolejną cechą charakterystyczną prac wspomnianego ośrodka w zakresie sterowania ślizgowego jest podejmowanie skutecznych prób wykorzystania opracowanych wyników teoretycznych dla nowych nietradycyjnych zastosowań, na przykład do sterowania w sieciach komputerowych. Inne zastosowania to systemy logistyczne, podjęte w recenzowanej pracy. Nowe zastosowania często wymagają rozszerzenia rozważań metodologicznych na nowe przypadki. Tak jest właśnie w tej pracy, gdzie wykorzystanie sterowania ślizgowego w systemach logistycznych wymagało opracowania teoretycznego takich jego wersji, w których nie występują zmiany znaku zmiennej sterującej charakterystyczne dla tradycyjnego sterowania ślizgowego,

a w samym obiekcie sterowania są obecne istotne opóźnienia wielkości wejściowych (sterowań).

Wymienione uwagi – w mojej opinii – świadczą o prawidłowym wyborze problemu badawczego, który jest ciekawy pod względem merytorycznym i stanowi właściwe wyzwanie naukowe dla pracy doktorskiej, a także jest ważny z punktu widzenia potencjalnego zastosowania, co jest niebagatelne przy ocenie rozprawy w dziedzinie nauk technicznych. Wybór tematu uważam za właściwy.

## II. ZAWARTOŚĆ ROZPRAWY

Rozprawa napisana w języku polskim liczy 117 stron i została podzielona na siedem rozdziałów uzupełnionych wykazem 152-ch pozycji literaturowych.

We Wstępie, czyli w pierwszym rozdziale dokonano przede wszystkim wprowadzenia w problematykę sterowania ślizgowego. Wyjaśniono ideę takiego sposobu sterowania osobno dla przypadku ciągłego i dyskretnego oraz podano podstawowe pojęcia ważne dla dalszych rozważań, np. definicję ruchu quasi-ślizgowego. Rozważania w tym rozdziale są faktycznie pogłębionym przeglądem literatury na temat nie tylko samej istoty sterowania ślizgowego, ale także jego ważnych rozszerzeń oraz przykładowych zastosowań. Odrębnie omówiono dwie popularne metody projektowania ślizgowego, czyli metodę opartą na doborze płaszczyzny ślizgowej oraz stosowaną w pracy metodę wykorzystującą przyjęty a priori przebieg zmiennej ślizgowej. Rozdział pierwszy kończą ogólne uwagi na temat systemów (układów) logistycznych, które w dalszej części rozprawy służą jako ilustracyjny przykład zastosowania jej wyników teoretycznych.

W krótkim trzystronicowym rozdziale drugim sformułowano dwie tezy pracy doktorskiej. Pierwsza z nich dotyczy lepszych wyników sterowania ślizgowego, w sensie odporności na zakłócenia zewnętrzne i niedokładności modelu, dla zaproponowanych w rozprawie reguł osiągnięcia trybu ślizgowego, a druga – możliwości zastosowania tych reguł w zarządzaniu dostawami towarów do magazynu w systemach logistycznych.

Kluczowe wyniki pracy są przedstawione w trzech kolejnych rozdziałach, w których sformułowano i badano trzy różne oryginalne reguły osiągnięcia trybu ślizgowego oraz ich zastosowanie w określonej klasie systemów logistycznych. Faktycznie, rozpatrywano przełączające i nieprzełączające reguły osiągnięcia trybu quasi-ślizgowego, czyli takie reguły, które w konsekwencji odpowiednio wymagają zmiany znaku sygnałów sterujących lub nie. I tak, rozdział trzeci jest poświęcony tak zwanym przełączającym regułom osiągnięcia trybu ślizgowego. Jak już wspomniano, chodzi o taką sytuację, gdy zmienna sterująca w trakcie sterowania musi zmieniać swój znak w każdym taktie sterowania. Podstawą badań autora jest wynik z pracy Gao, Wanga i Homaifa opublikowanej w r. 1995. Modyfikacja tego wyniku polegała na zastąpieniu liniowej funkcji zmiennej ślizgowej trzema funkcjami nieliniowymi, a mianowicie

funkcjami homograficznymi, arcus tangens i tangens hiperboliczny. Dla tych trzech modyfikacji rozważania są prowadzone w sposób jednolity, tzn. są rozpatrywane przypadki sterowania liniowymi układami rzędu  $n$  bez zakłóceń oraz z zakłóceniami opisywanymi poprzez dodanie do równań stanu wyrażen liniowych określających zewnętrzne zakłócenia oraz wpływ niepewności modelowania. Dla obu tych przypadków doktorant podaje regułę osiągnięcia trybu ślizgowego, projektuje regulator, uzasadnia występowanie ruchu quasi-ślizgowego oraz udowadnia jego podstawowe właściwości, w tym oblicza szerokość pasma dla ruchu ślizgowego.

Zawartość merytoryczna rozdziału czwartego jest analogiczna do zawartości rozdziału poprzedniego, tylko dotyczy reguł nieprzełączających, które realizują inaczej zdefiniowany tryb ruchu quasi-ślizgowego. Różnica w stosunku do trybu rozważanego w rozdziale trzecim polega na pominięciu wymagania o przekraczaniu przez trajektorię sterowania płaszczyzny ślizgowej w każdym takcie sterowania, co w konsekwencji prowadzi do wyznaczania sygnałów sterujących o tym samym dodatnim znaku, co ma znaczenie dla niektórych zastosowań, w których niekorzystne jest generowanie sygnałów o ujemnej wartości.

Rozdział piąty jest poświęcony zarządzaniu dostawami w systemie logistycznym z jednym magazynem. Centralnym elementem tego systemu jest jeden magazyn, który może być zasilany towarami od wielu dostawców. Jest on opisywany w przestrzeni stanów, jako dyskretny liniowy obiekt dynamiczny z opóźnieniami. Możliwość wykorzystania opracowanych regulatorów ślizgowych do sterowania obiektami z opóźnieniem jest poważnym osiągnięciem pracy, zauważonym przez autora w tytule rozprawy. Do wyznaczania wielkości dostaw towarów do magazynu wykorzystano wyznaczone w poprzednim rozdziale regulatory quasi-ślizgowe, bazujące na regułach nieprzełączających oraz w celach porównawczych tzw. regulator „dead-beat”. Dla każdego z tych czterech regulatorów oszacowano zakres zmienności sygnału sterującego, a także podano warunki na brak możliwości przekraczania pojemności magazynu oraz na stałą dostępność towaru w magazynie.

W rozdziale szóstym przedstawiono i skomentowano wyniki eksperymentu obliczeniowego, w którym dla jednej instancji danych obliczono: przebiegi sygnału sterującego opisanym w rozdziale piątym obiektem, przebiegi wielkości wyjściowej oraz przebiegi zmiennej ślizgowej dla wszystkich rozpatrywanych w pracy regulatorów, a także dla regulatora opisanego w artykule Gao, Wanga i Homaifa.

Rozdział siódmy jest krótkim podsumowaniem całej pracy.

### III. ORYGINALNE OSIĄGNIĘCIA

Zasadniczym wynikiem rozprawy doktorskiej jest zaprojektowanie trzech dyskretnych regulatorów dla dyskretnego liniowego obiektu sterowania  $n$ -tego rzędu – umożliwiających quasi-ślizgowy przebieg trajektorii w przestrzeni stanu, wykazanie ich podstawowych właściwości

oraz porównanie z analogicznym regulatorem znanym z literatury. Na ten rezultat składają się następujące najważniejsze wyniki cząstkowe:

1. Opracowanie nowych reguł osiągnięcia trybu ślizgowego, w których szybkość zmian zmiennych ślizgowych jest opisywana trzema funkcjami nieliniowymi. Wykorzystanie tych reguł umożliwiło uzyskanie – w stosunku do analogicznych rozwiązań znanych z literatury, w zwłaszcza do prac bazujących na regule przedstawionej w artykule Gao, Wang i Homaifa – szybszej zbieżności zmiennych ślizgowych do odpowiednich płaszczyzn ślizgowych i zmniejszenie szerokości pasma ruchu quasi-ślizgowego, a w konsekwencji większą odporność systemu sterowania na zakłócenia.
2. Zaproponowanie – w nawiązaniu do wcześniejszych prac powstałych w ośrodku łódzkim – nieprzełączających wersji reguł osiągnięcia trybu ślizgowego, wymienionych w poprzednim punkcie. Uzyskane w wyniku zastosowania tych reguł sygnały sterujące oraz systemy sterowania z regulatorami ślizgowymi mają także szereg korzystnych właściwości takich jak np. lepsza niż w rozwiązaniach referencyjnych odporność na zakłócenia.

Warto podkreślić, że wszystkie uzyskane właściwości dotyczące dynamiki ruchu ślizgowego, sygnałów sterujących oraz wielkości wyjściowych w systemach regulacji zostały przedstawione w postaci odpowiednich twierdzeń i udowodnione.

Ciekawym elementem pracy jest także podjęcie próby zastosowania uzyskanych wyników dotyczących ruchu ślizgowego w wersji nieprzełączającej, czyli z wykluczeniem możliwości generowania ujemnych wartości zmiennych sterujących, do zarządzania dostawami towaru do magazynu w systemie logistycznym.

Charakteryzując oryginalne osiągnięcia doktoranta, należy pozytywnie podkreślić fakt jego bardzo bogatego, ponadstandardowego dorobku publikacyjnego.

#### IV. UWAGI KRYTYCZNE I POLEMICZNE

Uwagi przedstawione w tej części mojej recenzji w zasadzie nie odnoszą się do zasadniczych wyników rozprawy, które wymieniłem w p. 1 i 2 poprzedniej części, tylko do sposobu prezentacji oraz przedstawionego zastosowania w systemach logistycznych z magazynem towarów. Tak więc, mają one charakter poboczny i niewpływający na ogólną bardzo wysoką ocenę całej pracy, ale dla porządku pozwalam sobie je wymienić.

1. Praca jest dość obszerna i bogata w treści merytoryczne. Na przykład przedstawiono wraz z dowodami 30 twierdzeń. Wprawdzie treść i sposób dowodzenia w części twierdzeń są analogiczne, jeśli dotyczą tych samych zagadnień dla trzech rozpatrywanych reguł osiągnięcia trybu ślizgowego, ale i tak materiał merytoryczny jest duży. Niestety w dużej części treść merytoryczna pracy jest zaprezentowana w sposób bardzo zwięzły, wręcz lapidarny, co w zasadniczy sposób utrudnia jego lekturę; dotyczy to zwłaszcza dowodów. Nie byłby to zbyt istotny zarzut, gdyby nie fakt, że niektóre fragmenty tekstu z powodu skrótowej

prezentacji są niemożliwe do weryfikacji. Jako przykłady podam następujące kwestie, które przede wszystkim dotyczą rozdziału piątego, poświęconego zastosowaniom regulatorów quasi-ślizgowych w systemie logistycznym. Nie jest jasny dla mnie wzór (137), a w konsekwencji dowód Twierdzenia 19 (w szczególności brak jest uzasadnienia pierwszej równości w (141)). Być może wynika to z pobieżnego wprowadzenia modelu na początku rozdziału 5. Na przykład, postaci macierzy  $A$  można się tylko domyślać na podstawie wzoru (126) i wcześniejszych informacji, wobec braku jej właściwego formalnego opisu. W dowodzie Twierdzenia 22 nie wiadomo z kolei, w jaki sposób zmienna sterująca może osiągnąć wartość zero. Przy prezentacji ważnych wzorów (147), (157) i (167), których wyprowadzenie pozostawiono czytelnikowi (jak zresztą w wielu innych bardziej krytycznych przypadkach), nie skomentowano faktu, że są one prawdziwe tylko wówczas, gdy wartości zmiennej ślizgowej  $s$  w dwóch kolejnych taktach  $k$  i  $k + 1$  są równe. Jeszcze inny przykład z zakresu sposobu prezentacji dotyczy dowodów twierdzeń 17. i 18. W dowodzie tego drugiego twierdzenia autor korzysta z tożsamości (120), tymczasem nie podaje jej w dowodzie poprzedniego twierdzenia, czytanego przecież wcześniej, gdzie ta sama tożsamość też jest wykorzystywana. Jeszcze innym przykładem skrótowej prezentacji są warunki (34) i (35). Z czego one wynikają?

2. Pewien niedosyt budzi cały rozdział 5. Pierwszą kwestią jest sam model w dyskretniej przestrzeni stanu. Brak jest uzasadnienia użyteczności i zasadności takiego właśnie modelu na tle literatury z tego zakresu. Na przykład brak jest chociażby krótkiej dyskusji stosowanych sposobów opisu rozważanej klasy systemów logistycznych oraz informacji o przyjętych założeniach upraszczających w stosunku do rzeczywistych systemów logistycznych. Z kwestii formalnych brakuje mi informacji o sposobie obliczania wartości wyjściowej  $y$  w chwili  $kT = 0$ ; w ogóle zakres zmienności zmiennej  $k$  nie jest podany, co jest szczególnie ważne dla (124) i (125). Druga kwestia to dyskusja na temat potencjalnej możliwości zastosowania regulatorów ślizgowych w tej klasie systemów logistycznych. Informacje na temat zainteresowania ze strony podmiotów gospodarczych proponowanym w pracy rozwiązaniem, a przede wszystkim technicznych możliwości wprowadzenia regulatorów quasi-ślizgowych do informatycznych systemów zarządzania przedsiębiorstw znacznie wzbogaciłyby ten aplikacyjny charakter rozprawy doktorskiej.
3. Strona formalna pracy jest właściwie bez zarzutu. Zauważyłem bardzo niewiele potknięć redakcyjnych. Podaję dwa przykłady nielicznych błędów redakcyjnych. W drugim czynniku po lewej stronie równania (22) brak jest symbolu wartości bezwzględnej. We wzorze (38) dla zachowania jednolitości wywodu powinna być użyta zmienna  $k$  zamiast  $j$ .

## V. KONKLUZJA

Stwierdzam, że w recenzowanej rozprawie doktorskiej mgra inż. Piotra Leśniewskiego został właściwie postawiony i rozwiązany oryginalny problem naukowy, polegający na zaprojektowaniu i przebadaniu trzech dyskretnych regulatorów quasi-ślizgowych o lepszych właściwościach niż referencyjny regulator znany z literatury oraz na wykazaniu możliwości ich wykorzystania do generowania zamówień w określonej klasie systemów logistycznych – czyli zostały spełnione wymogi stawiane tego typu pracom w odpowiedniej Ustawie o tytule i stopniach naukowych.

Na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie mgra inż. Piotra Leśniewskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Biorąc dodatkowo pod uwagę fakt wysokiej wartości naukowej uzyskanych wyników, potwierdzony wieloma publikacjami, w tym artykułami w renomowanych czasopismach z bazy JCR, rekomenduję wyróżnienie tej rozprawy doktorskiej.

