

Dr hab. inż. Dominik Sierociuk
Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej
Wydział Elektryczny
Politechnika Warszawska

Warszawa, 23.08.2022 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pana
mgra inż Marcina Gałka,

pt. Linear and non-linear block-oriented fractional order models with application to prediction and control of discrete-time fractional order systems"

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika prof. dr. hab. inż. Dariusza Zmarzły z dnia 23 czerwca 2022 r.

1. Teza, cel i problematyka rozprawy

Rozprawa doktorska Pana Marcina Gałka dotyczy różnych metod aproksymacji różnicy niecałkowitego rzędu wraz z ich zastosowaniem do modelowania i sterowania predykcyjnego liniowych o nieliniowych układów niecałkowitego rzędu. Problematyka ta jest ważna z zarówno z teoretycznego, ale i z praktycznego punktu widzenia, jak na przykład realizacji cyfrowych układów regulacji. Często spotykana w literaturze podstawowa metoda aproksymacji różnicy niecałkowitego rzędu zgodnie z definicją Grunwalda-Letnikowa posiada przynajmniej dwie niedogodności: dużą zależność dokładności aproksymacji od długości implementacji oraz problemy z zachowaniem wzmocnienia statycznego danego członu dynamicznego. Problemy te bardzo silnie uwidaczniają się w przypadku zastosowania tej metody aproksymacji w sterowaniu, jak na przykład regulatorze PI, kiedy to możemy utracić bardzo ważną własność redukcji uchybu. Dlatego poszukiwane są cały czas lepsze metody aproksymacji operatorów niecałkowitego rzędu, które będą lepiej odpowiadać wymaganiom stawianym w danych zastosowaniach. Zespół, w którym pracuje Doktorant, opracował już wiele interesujących wyników z tej dziedziny i zagadnienia przedstawione w recenzowanej rozprawie dobrze rozszerzają wcześniejsze rezultaty.

Teza jaką postawił sobie Pan Marcin Gałka dotyczy możliwości dokładnego i efektywnego z punktu widzenia numerycznego realizowania liniowych i blokowo-orientowanych

nieliniowych układów niecałkowitego rzędu. Teza oczywiście jest bardzo ogólna, ale w wystarczający sposób opisuje zawartość merytoryczną pracy.

Opiniowana rozprawa doktorska składa się z wprowadzenia i czterech zasadniczych rozdziałów, zakończenia oraz spisu literatury zawierającego 183 pozycje prac z dziedziny rachunku różniczkowego niecałkowitego rzędu, układów dynamicznych niecałkowitego rzędu oraz teorii sterowania, identyfikacji i sterowania predykcyjnego.

We wprowadzeniu Autor pracy przedstawia krótki rys historyczny rachunku niecałkowitego rzędu oraz dokonuje przeglądu literatury w tym zastosowań inżynierskich rachunku niecałkowitego rzędu ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań w dziedzinie Automatyki i Robotyki. W rozdziale drugim Doktorant formułuje tezę i cel pracy, jak również dokonuje przedstawienia spisu swoich osiągnięć zawartych w recenzowanej pracy.

W rozdziale trzecim przedstawione jest wprowadzenie do zagadnienia pochodnych i różnic niecałkowitego rzędu wraz z ich różnymi sposobami realizacji. W tym rozdziale Autor przedstawia im mniej różne metody realizacji operatorów niecałkowitego rzędu, w tym metodę opartą na dyskretyzacji Al-Alaoui oraz analizę optymalnego doboru parametrów dla tego algorytmu. Zostały także przedstawione wyniki porównania efektywności wybranych metod aproksymacji operatorów niecałkowitego rzędu.

Rozdział czwarty traktuje o sposobach realizacji liniowych układów niecałkowitego rzędu w oparciu o zdefiniowane w rozdziale trzecim aproksymacji operatorów niecałkowitego rzędu. Przy czym rozdział zawiera zarówno wyniki otrzymane dla modeli transmitancyjnych jak i opisanych w przestrzeni stanu. W rozdziale tym przedstawione są także metody identyfikacji oraz wyniki symulacji dla różnego typu obiektów zrealizowanych z użyciem różnego typu aproksymatorów.

W rozdziale piątym zostały przedstawione wybrane metody realizacji zorientowanych blokowo nieliniowych układów niecałkowitego rzędu z użyciem różnych aproksymatorów operatorów niecałkowitego rzędu. Autor dokonuje przy tym serię badań symulacyjnych dla poszczególnych metod i typów nieliniowości.

Rozdział szósty natomiast przedstawia zastosowanie wybranych aproksymatorów operatorów niecałkowitego rzędu do budowy predyktorów dla sterowania predykcyjnego.

Otrzymane wyniki zostały zilustrowane szeregiem przykładów numerycznych zarówno przygotowane dla modeli liniowych jak i nieliniowych.

Na zakończenie w rozdziale siódmym Doktorant przedstawia wnioski ze swoich prac oraz propozycje przyszłego rozwinięcia osiągniętych wyników.

2. Ocena rozprawy

Uwagi ogólne

Przedstawioną pracę doktorską oceniam pozytywnie. Autor z powodzeniem rozwiązał kilka trudnych problemów naukowych i inżynierskich. Zastosował przy tym poprawne metody modelowania i analizy liniowych i nieliniowych układów dynamicznych niecałkowitego rzędu. Ponadto rozprawa zawiera dużą ilość informacji na temat aproksymatorów operatorów niecałkowitego rzędu, a także realizacji liniowych i nieliniowych układów dynamicznych niecałkowitego rzędu, co świadczy o szerokiej wiedzy Autora w dziedzinach wchodzących w zakres prezentowanej rozprawy.

Praca napisana jest czytelnie i jest dobrze zredagowana, jednakże zdecydowanie praca zyskałaby, gdyby Autor wyróżniał najważniejsze wyniki w postaci twierdzeń, lematów czy definicji.

Za główne osiągnięcia pracy uważam:

1. Analiza numeryczna zastosowania aproksymatora Al-Alaoui do operatorów niecałkowitego rzędu oraz określenie sposobu na optymalny dobór parametrów implementacji tego aproksymatora w zależności od wartości niecałkowitego rzędu aproksymowanego operatora.
2. Podanie sposobu optymalnego doboru wag współczynników aproksymatora NFFD jako funkcji niecałkowitego rzędu operatora.
3. Podanie algorytmu realizacji układów niecałkowitego rzędu będącego formą generalizacji algorytmu FIR w oparciu o funkcje bazowe (Fractional Difference Basis Function based model), które zostały zdefiniowane dla różnych metod aproksymacji.

4. Zdefiniowanie funkcji predyktorów dla liniowych i nieliniowych blokowo układów niecałkowitego rzędu. Funkcje predyktorów zostały zdefiniowane zarówno dla aproksymacji opartej na funkcjach Laguerre jak i innych typów aproksymacji.

Zdecydowana większość tych osiągnięć była wcześniej publikowana w recenzowanych czasopismach bądź materiałach konferencyjnych, co ułatwia stwierdzenia ich oryginalności i wagi naukowej.

Uwagi krytyczne i pytania:

Poniżej przedstawiam krytyczne uwagi merytoryczne oraz pytania:

1. Doktorant jako swoje osiągnięcia przedstawił także implementację różnic niecałkowitego rzędu jednak w swej pracy nie zawarł szczegółów tego działania. Jakie były najważniejsze problemy w ich implementacji, czy wymagały jakiegoś dodatkowego działania polegającego na przykład na optymalizacji sposobu wyznaczenia współczynników czy sposobu organizacji danych?
2. W tezie pracy Doktorant wskazał możliwość efektywnej realizacji układów niecałkowitego rzędu zarówno pod względem dokładności jak i obliczeniowej. O ile kwestia dokładności aproksymacji była szeroko opisana, to kwestia efektywności numerycznej była już dużo skromniej przedstawiona. Czy Doktorant może przedstawić wyniki porównania czasu wykonywania (czy złożoności obliczeniowej) dla wybranych metod aproksymacji i porównać je z metodą Al-Alaoui'ego?
3. W przypadku modelowania układów opisanych w przestrzeni stanów (wzór 4.8) Doktorant przyjął różnicę z równania systemowego wyznaczaną dla chwili 'k'. Prowadzi to do sytuacji, w której dla typowej metody aproksymacji różnicy niecałkowitego rzędu aktualna próbka wyjściowa zależy bezpośrednio od próbki sygnału wejściowego, czyli do relacji w praktyce nierealizowalnej. Co więcej, w podpunkcie 2 na stronie 57 dla jednej z dyskretyzacji ta różnica jest zdefiniowana dla chwili 'k+1'. Jaki jest powód takiego zdefiniowania? Jakie implikacje mogłoby mieć zdefiniowanie tej różnicy dla chwili 'k+1' dla innych zaprezentowanych dyskretyzacji?

4. W podrozdziale 4.5.1 Autor rozprawy przedstawia zastosowanie algorytmów LS i RLS do identyfikacji parametrów. Przy podobnie zdefiniowanych wektorach danych dla identyfikacji dyskretnego układu niecałkowitego rzędu opisanego w przestrzeni stanów (DFOSS) można było zauważyć dużą wrażliwość metody na niewielkie błędy danych (jak na przykład błędy dyskretyzacji). Problem ten można było rozwiązać przez zastosowanie minimalizacji numerycznej minimalizującej funkcję celu daną równaniem 4.57. Czy Doktorant zauważył podobne problemy w przypadku otrzymanych wyników identyfikacji parametrów aproksymatorów?

Wniosek końcowy

Recenzowana praca doktorska jest interesującą próbą rozwiązania ważnych z praktycznego punktu widzenia problemów modelowania układów niecałkowitego rzędu. Jest poprawnie skomponowana, aczkolwiek zdecydowanie można by poprawić jej czytelność poprzez oznaczanie najważniejszych wyników w postaci twierdzeń, lematów czy definicji. Praca liczy 139 stron i zawiera oprócz oryginalnych wyników Autora również wyprowadzenie do tematyki pracy, krótki przegląd zastosowań rachunku niecałkowitych rzędów, co może być pomocne dla mniej wprowadzonego w zagadnienie czytelnika i świadczy o wiedzy Autora w omawianych dziedzinach. Autor postawił sobie w pracy ważne zadania badawcze i przedstawił oryginalne metody jego rozwiązania. Metody te jak wykazano w pracy są właściwe. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają całkowitej pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej. Na uwagę zasługuje fakt opublikowanie wyników pracy w 21 artykułach naukowych, w większości konferencyjnych (MMAR, SPETO) oraz w Zeszytach naukowych Politechniki Opolskiej. Na uwagę zasługuje 5 artykułów samodzielnych Doktoranta, co podkreśla Jego samodzielność naukową, natomiast pewien niedosyt pozostawia brak publikacji w czasopiśmie nieco wyżej punktowanym. W związku z powyższym stwierdzam, że praca spełnia wymogi określone w Artykule 13, punkt 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki (D.U. nr 65 z 16 kwietnia 2003, poz. 595 z późniejszymi zmianami) i wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr inż. Marcina Gałka do publicznej obrony pracy doktorskiej.