

Kraków 19 07 2022 r.

*Dr hab. inż. Krzysztof Oprzędkiewicz, prof. AGH
AGH, Wydział EAIiB
Katedra Automatyki i Robotyki*

**Recenzja
Rozprawy doktorskiej
Mgr inż. Marcina Gałka
Tytuł rozprawy:**

„Linear and non-linear block-oriented fractional order models with application to prediction and control of discrete-time fractional order systems (Liniowe i nieliniowe blokowo-zorientowane modele frakcyjne w zastosowaniach do predykcji i sterowania dyskretnymi obiektami frakcyjnymi)”

**Dziedzina: nauki techniczne,
Dyscyplina: Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika.**

Recenzowana praca powstała pod kierunkiem naukowym dr hab. inż. Rafała Stanisławskiego, prof. PO. Niniejszą recenzję przygotowano na podstawie uchwały Rady Naukowej dyscypliny AEE Politechniki Opolskiej nr 36 z dnia 02 06 2022r.

1. Cel i teza rozprawy

Rachunek różniczkowy niecałkowitego rzędu staje się obecnie niezwykle dogodnym narzędziem do opisu wielu rzeczywistych złożonych procesów fizycznych, zachodzących zarówno w systemach technicznych, jak też w biologii, medycynie, ekonomii i naukach społecznych. Wynika to z faktu, że w wielu wypadkach model niecałkowitego rzędu, mający postać równania różniczkowego lub transmitancji pozwala lepiej opisać rzeczywisty proces, niż model rzędu całkowitego. Zastosowanie podejścia ułamkowego pozwala na uzyskanie modeli stosunkowo prostych, a jednocześnie bardzo dokładnych.

Jednocześnie należy zauważyć, że praktyczne zastosowanie modeli i algorytmów sterowania niecałkowitego rzędu wymaga stosowania aproksymacji operatora niecałkowitego rzędu możliwych do implementacji cyfrowej.

Aproksymacja taka powinna być skończenie wymiarowa i całkowitego rzędu oraz cechować się dobrą dokładnością przy niezbyt wysokiej złożoności obliczeniowej. W tym miejscu należy zaznaczyć, że „klasyczne” dyskretne modele operatorów niecałkowitego rzędu, bazujące na definicji Grunwalda-Letnikova cechują się znaczną złożonością obliczeniową. Z kolei podejście bazujące na aproksymacji CFE, które jest znacznie prostsze obliczeniowo, nie zawsze zapewnia satysfakcjonującą dokładność.

Z powyższych względów **teza pracy** sformułowana na stronie 19 rozprawy może być uznana za trafną i dobrze oddającą zakres badań podjętych przez Doktoranta. Brzmi ona następująco:

„Zastosowanie liniowych i nieliniowych orientowanych blokowo modeli niecałkowitego rzędu pozwala na konstrukcję modeli efektywnych zarówno z punktu widzenia dokładności jak i złożoności obliczeniowej”

W celu udowodnienia powyższej tezy zdefiniowano następujące zagadnienia badawcze:

- Opracowanie zestawu liniowych i nieliniowych modeli zorientowanych blokowo, bazujących na ułamkowych równaniach różnicowych. Modele te powinny się charakteryzować względnie niską złożonością obliczeniową, co umożliwi ich zastosowanie m.in. w sterowaniu predykcyjnym niecałkowitego rzędu.
- Implementacja opracowanych modeli w algorytmie sterowania predykcyjnego.

2. Przegląd treści rozprawy

Recenzowana rozprawa liczy 139 stron, tekst został podzielony na 7 rozdziałów głównych, bibliografię oraz spisy skrótów, rysunków i tabel. Przegląd zawartości rozprawy jest skrótowo przedstawiony poniżej.

Rozdziały 1 i 2 są wstępem do pracy.

Rozdział 1 wprowadza do tematyki rachunku niecałkowitego rzędu oraz prezentuje przegląd „state of the art” z zakresu pracy.

W **rozdziale 2** sformułowano tezę pracy i podano zagadnienia badawcze niezbędne do jej udowodnienia, zaprezentowano także zagadnienia omawiane w dalszych rozdziałach oraz najważniejsze osiągnięcia Autora.

Główne wyniki rozprawy są zaprezentowane w rozdziałach 3 – 6. Prezentowane wyniki badań poprzedzone są preliminariami teoretycznymi oraz ilustrowane symulacjami.

W **rozdziale 3** na początku zaprezentowano podstawowe pojęcia i definicji pochodnej i różnicy ułamkowego rzędu. Zaprezentowano trzy „klasyczne” definicje: Riemanna-Liouville’a (RL), Caputo (C) i Grunwalda-Letnikova (GL). i omówiono ich podstawowe własności.

Następnie omówiono schematy różnicowe stosowane do implementacji cyfrowej operatora ułamkowego. Rozpoczęto od najbardziej „intuicyjnego” schematu, jakim jest aproksymacja PSE bazująca bezpośrednio na definicji GL. Następnie omówiono schematy Tustina-CFE, Tustina-Muira, Al.-Alaoui oraz Laguerre’a.

Dla omawianych aproksymacji podano przykłady oraz dokonano analizy ich dokładności w dziedzinie częstotliwości i czasu oraz w funkcji rzędu oraz parametrów. Na podkreślenie zasługuje podanie dokładnych wartości współczynników poszczególnych aproksymacji w tabelach 3.1-3.4 dla wybranych ułamkowych rzędów.

W dalszej części rozdziału omówiono metodę aproksymacji wykorzystującą redukcję rzędu modelu w celu obniżenia jego złożoności obliczeniowej. Dokładność wszystkich aproksymacji została oszacowana z użyciem funkcji kosztu MSE.

W **rozdziale 4** omówiono zastosowanie aproksymacji rozważanych w rozdziale 3 do modelowania systemów dynamicznych ułamkowego rzędu.

Na początku rozdziału zdefiniowano ciągłe w czasie równanie różniczkowe niecałkowitego rzędu, transmitancję niecałkowitego rzędu i równanie stanu niecałkowitego rzędu. Przypomniano również podstawowy warunek stabilności układów niecałkowitego rzędu, sformułowany przez Tw. Matignona.

Następnie zaprezentowano dyskretne równanie stanu niecałkowitego rzędu i transmitancję dyskretną oraz omówiono metody zapisu równania dyskretnego z użyciem aproksymacji rozważanych w rozdziale 3 pracy.

W dalszej części rozdziału zaprezentowano metodę OBF (ang. Orthonormal Basis Function), która może być zastosowana do modelowania systemów dyskretnych zarówno całkowitego jak i niecałkowitego rzędu. Jako zestawy funkcji bazowych stosowane są w tym wypadku funkcje Laquerre'a lub Kautza.

Dalej zaprezentowano nowe modele heurystyczne będące „ułamkowym” uogólnieniem klasycznego modelu FIR (Finite Impulse Response) oraz metodę estymacji parametrów tych modeli z użyciem metody najmniejszych kwadratów w wersjach: „klasycznej”, offline i rekursywnej.

Wyniki prezentowane w tym rozdziale zostały również zilustrowane przykładami symulacyjnymi pozwalającymi na ocenę dokładności poszczególnych aproksymacji.

W **rozdziale 5** rozważono nieliniowe systemy ułamkowe orientowane blokowo. Na początku zaprezentowano 3 podstawowe modele stosowane w podejściu orientowanym blokowo: model Hammersteina, Wienera i model ze sprzężeniem zwrotnym.

W każdym z przypadków zaprezentowano „ułamkowe” uogólnienie tych modeli, zbudowane z użyciem aproksymacji prezentowanych we wcześniejszych rozdziałach pracy. Wyniki teoretyczne zostały również poparte badaniami symulacyjnymi.

Rozdział 6 prezentuje zastosowanie modeli prezentowanych we wcześniejszych rozdziałach do realizacji sterowania predykcyjnego.

Najpierw omówiono konstrukcję predyktorów stanu z wykorzystaniem aproksymacji rozważanych we wcześniejszych rozdziałach pracy.

W przypadku systemów liniowych zaprezentowano algorytm budowy predyktora dla systemu FD/FFD wraz z analizą jego złożoności obliczeniowej. Omówiono także predyktory dla systemu zbudowanego z użyciem podejścia wykorzystującego redukcję rzędu (Order Reduction Based Model) oraz systemu modelowanego z użyciem filtrów Laguerre'a. Dla systemów nieliniowych i modelu Hammersteina zaprezentowano modelowanie odwrotne z użyciem OBF (baza funkcji ortogonalnych).

W drugiej części rozdziału zaprezentowano sterowanie predykcyjne z rozszerzonym horyzontem predykcji (EHPC) wykorzystujące „bank predyktorów” zaprezentowany na

początku tego rozdziału. Rozważana metoda może być zastosowana do sterowania stabilnych systemów nieminimalnofazowych.

Na końcu rozdziału zaprezentowano przykłady symulacyjne, ilustrujące podane wcześniej wyniki.

Rozdział 7 stanowi podsumowanie pracy oraz propozycje kierunków dalszych badań w obszarze rozważanej tematyki.

Bibliografia pracy jest obszerna, liczy 21 pozycji, których współautorem jest Doktorant oraz 183 pozostałe pozycje, co daje łącznie 204 pozycje. Zakres tematyczny bibliografii jest dobrany poprawnie pod kątem prezentacji rozważanej w pracy problematyki.

Osiągnięcia rozprawy

Na podstawie zapoznania się z treścią rozprawy można stwierdzić, że główne osiągnięcia Autora obejmują zagadnienia związane z dyskretnymi aproksymacjami skończenie wymiarowymi liniowych i nieliniowych układów niecałkowitego rzędu oraz ich zastosowanie w sterowaniu predykcyjnym. Osiągnięcia te stanowią znaczny wkład w rozważany obszar rachunku ułamkowego. W szczególności można tu wskazać:

- Opracowanie obszernej analizy dokładności rozważanych aproksymacji w dziedzinie częstotliwości i czasu. Dokładność ta była analizowana w funkcji rzędu ułamkowego, rzędu modelu opisanego przez długość pamięci oraz współczynników wagowych.
- Przygotowanie i prezentacja (w tabelach 3.2- 3.4) gotowych wielomianów aproksymacyjnych dla wybranych rzędów ułamkowych i kilku typowych rzędów aproksymacji.
- Wykonanie dokładnej analizy porównawczej różnych schematów różnicowych stosowanych do modelowania dyskretnego systemów ułamkowego rzędu.
- Dokonanie istotnej z punktu widzenia zastosowań praktycznych analizy złożoności obliczeniowej rozważanych metod aproksymacji. Należy tu zauważyć, że tego typu analizy są prowadzone stosunkowo rzadko.
- Udział w opracowaniu aproksymacji elementów nieliniowych ułamkowego rzędu w oparciu o modele Wienera, Hammersteina i ze sprzężeniem zwrotnym.
- Zastosowanie rozważanych metod aproksymacji do konstrukcji różnych algorytmów sterowania predykcyjnego systemami ułamkowego rzędu.

Podsumowując, recenzowana praca może stanowić cenny podręcznik z zakresu dyskretnych modeli niskiego rzędu dla systemów ułamkowych. Z tego względu należy pochwalić przygotowanie tekstu w języku angielskim, gdyż po jego opublikowaniu (bezpośrednio lub w formie książkowej) ma ona szansę na wysoką cytowalność.

Na podstawie powyższych rozważań można stwierdzić, że **hipoteza naukowa pracy, podana na początku niniejszej recenzji została potwierdzona.**

3. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

Podczas lektury tekstu recenzowanej rozprawy nasunęły mi się również pewne uwagi o charakterze dyskusyjnym. Część z nich ma naturę bardziej ogólną, a część jest szczegółowa. Są one podane poniżej.

3.1. Uwagi ogólne

- W pracy zaprezentowano dużą liczbę wyników o charakterze teoretycznym, które zostały zilustrowane poprawnie dobranymi przykładami symulacyjnymi. Zdecydowanie brakuje jednak weryfikacji prezentowanych modeli z wykorzystaniem danych doświadczalnych z rzeczywistych obiektów, które mogą być opisane rozważanymi modelami.
- Analiza dokładności prezentowanych modeli dyskretnych była prowadzona w dziedzinie częstotliwości oraz w dziedzinie czasu, na podstawie odpowiedzi skokowej. Referencyjne wykresy Bodego i Nyquista są pokazane na rys. 3.1 i 3.2 oraz są opisane wzorem (3.15). Dlaczego nie podano analogicznych wykresów i wzoru dla odpowiedzi skokowej elementu ułamkowego?
- W niektórych przypadkach porównywano charakterystyki modeli z charakterystykami dokładnymi. Ten sposób jest logiczny i został zastosowany np. na rysunkach: 3.20-3.22. Pojawia się pytanie, dlaczego nie zastosowano go wszędzie?
- W przypadku prezentacji systemów sterowania (rozdział 6 pracy) brakuje schematów blokowych tych systemów sterowania. Z tego względu trudno się np. zorientować, czy rozważane jest sterowanie w układzie otwartym, czy zamkniętym?
- Fundamentalną własnością każdego systemu dynamicznego (również ułamkowego) jest jego stabilność. W pracy jedyną wzmianką o stabilności jest Tw. Matignona podane na s 46, które potem nie jest nigdzie stosowane. Brakuje natomiast znanych warunków stabilności dla dyskretnych systemów ułamkowych, np. warunku pozwalającego na oszacowanie stabilności systemu dyskretnego na podstawie lokalizacji widma systemu ciągłego.

3.2. Uwagi szczegółowe

- We wstępie na s. 16 wśród podstawowych obszarów zastosowań rachunku niecałkowitego rzędu w automatyce i robotyce nie wymieniono jednego z najbardziej znanych obszarów, jakim jest sterowanie PID niecałkowitego rzędu, które może być uznane za „klasykę” zastosowań.
- Rys 3.14 s 43 – skąd się wziął „pik” przy wartości $\alpha = 0.3$?
- S 56 – przy podaniu Tw. Matignona warto było dodać rysunek prezentujący obszary stabilności na płaszczyźnie zespolonej dla $0.0 < \alpha < 1.0$ i $1.0 < \alpha < 2.0$, bo występują tu istotne różnice w stosunku do układów całkowitego rzędu.
- S 57 po równaniu (4.8) pojawia się stwierdzenie że macierze A, B, C są „te same” co w przypadku ciągłym. Nie można go uznać za fortunne do końca, gdyż system dyskretny, który jest odpowiednikiem ciągłego, jest opisany macierzami, które są wyznaczone na podstawie macierzy ciągłych, ale nie są im równe. Dla systemu dyskretnego i ciągłego równe są tylko macierze wyjścia C. Macierz stanu A i sterowań B muszą być przeliczone zgodnie z zastosowanym schematem różnicowym. Bezpośrednie użycie macierzy stanu systemu ciągłego w systemie dyskretnym poskutkowałoby w przypadku ogólnym choćby niestabilnością systemu dyskretnego ze względu na inne warunki stabilności.

- S 62 po równaniu (4.35) – podano, że współczynniki $(-1)^j \binom{\alpha}{j}$ mogą być liczone rekursywnie. Warto podać wzór na ich obliczanie, gdyż jest on przydatny w praktyce.
- S71, przykład 7.2 – w jakim sensie system rzędu całkowitego rozważany w tym przykładzie jest ekwiwalentem systemu ułamkowego rozważanego w przykładzie poprzednim?
- S 88 przed wzorem (5.43) – podano, że sygnał wejściowy musi mieć niską wartość. Jaka konkretnie ta wartość powinna być?
- S94 równanie (6.1) – jaki jest związek pomiędzy okresem próbkowania i opóźnieniem?
- S94 u dołu pojawiają się pojęcia: „perfect regulation” i „bank predyktorów” (ang. „bank of predictors”). Warto byłoby je objaśnić.

4.Strona formalna

Tekst rozprawy przygotowano w języku angielskim. Generalnie układ pracy jest poprawny i spójny logicznie. Uwagi redakcyjne są podane poniżej.

- Na podkreślenie zasługuje oddzielna prezentacja publikacji, których Autorem bądź Współautorem jest Doktorant. Jednakże należy zauważyć, że te prace w większości (poza pracami 162, 164 i 167 w „głównej” bibliografii) nie są w tekście rozprawy cytowane. Ogromnie utrudnia to precyzyjne określenie, co w której pracy zostało wcześniej opublikowane?
- Autor rozprawy prezentuje własne wyniki bezpośrednio poprzedzone preliminariami teoretycznymi. W związku z tym identyfikacja dorobku Autora stanowiącego Jego wkład w rozwój nauki jest w niektórych fragmentach pracy dość trudna.
- Czas jest oznaczany przez „t” zarówno w przypadku ciągłym, np. w równaniu (4.5), jak też w dyskretnym, jak np. (6.1). Należałoby zastosować osobne symbole na czas ciągły i dyskretny.
- Może niepotrzebnie zastosowano podział pracy z aż trzema lub czterema (rozdział 5) poziomami „zagnieżdżenia”, przy czym „pod-podrozdziały” są zwykle b. krótkie. W mojej opinii podział na dwa poziomy byłby w zupełności wystarczający.
- Warto było uporządkować lokalizację nagłówek tabel, np. nagłówki tabel 3.1, 3.2, 3.3, 3.6 są pod tabelą, a nagłówki tabel 3.4 i 3.5 są nad tabelą. To samo – tabele 4.1 i 4.2, 4.4 i 4.5.
- S59¹² – brakuje nru wzoru.
- W tekście dostrzeżono błędy językowe i „literówki” przykładowo: spis treści s 9 powinno być „Conclusions”, s23, 34 – W tytułach podrozdziałów 3.1.1, 3.1.2 i 3.1.3 powinno się pojawić „definition”, s27¹¹ lepiej byłoby „obtain” zamiast „receive”, s 33 tytuł rozdziału 3.3.2: powinno się pojawić słowo „approximation”, lub „scheme”, s 44¹³ – literówka, s 44⁶ brakuje słowa „describe” lub „present”, s45^{2,9,12} – literówki, s47⁶ – powinno być raczej „presents comparison”, s57 tytuł rozdziału 4.2 – 2 razy jest słowo „system”, s58¹² – literówka, s 60³ – literówka, s62⁹ – lepiej byłoby „to describe”, s 66⁵ – powinno być „from” (nb. b. częsty błąd), s 81³ – powinno być „shows”, s98³- powinno być „approximates”, s103⁶⁻¹⁰, s 104^{13,14} - całe zdania do poprawy, s 106¹⁴ – literówki.

5.Podsumowanie

Podsumowując, stwierdzam, że uwagi dyskusyjne i krytyczne podane w punktach 3 i 4 w żadnym wypadku nie umniejszają wartości naukowej ocenianej pracy. Uważam, że praca opisuje obszerny, wartościowy i oryginalny dorobek naukowy Doktoranta w zakresie rachunku niecałkowitego rzędu i jego zastosowań w automatyce i modelowaniu systemów dynamicznych.

Zakres i poziom naukowy uzyskanych wyników badawczych odpowiadają ustawowym i zwyczajowym wymaganiom, stawianym rozprawom na stopień doktora nauk technicznych. Wnioskuje zatem do Wysokiej Komisji powołanej przez Radę Naukową Dyscypliny AEE Politechniki Opolskiej o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autora, mgr inż. Marcina Gałka do publicznej obrony.



