

Białystok, 6 grudnia 2023r

dr hab. Ewa Pawłuszewicz, prof. PB
Politechnika Białostocka
Instytut Inżynierii Mechanicznej
Wydział Mechaniczny
ul. Wiejska 45C
15-351 Białystok

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 13.12.2023

Zarejestrowano pod nr

Podpis 

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Żegleń-Włodarczyka pt.

Szybkie sterowanie niecałkowitego rzędu obiektami nieliniowymi

Formalną podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyki, Elektroniki, Elektrotechniki i Technologii Kosmicznych dr hab. inż. Ryszarda Soroki, prof. AGH z dnia 27 października 2023r wystosowane na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Automatyki, Elektroniki, Elektrotechniki i Technologii Kosmicznych, Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Krzysztof Oprzędkiewicz

Promotor pomocniczy: dr inż. Maciej Rosół

1. Tezy i przedmiot rozprawy

Pochodna niecałkowitego rzędu jest rozszerzeniem klasycznej pochodnej na przypadek, gdy jej rząd jest pewną liczbą rzeczywistą lub zespoloną. I chociaż początki rachunku niecałkowitego rzędu sięgają końca XVII wieku, to pierwsze opracowanie monograficzne z tego zakresu pochodzi dopiero z 1974r (K.B. Oldhman, J. Spainer, *The fractional calculus*, Academic Press), a jedna z pierwszych monografii dotyczących zastosowań rachunku niecałkowitego rzędu w teorii sterowania z 1983r (A. Ostalup, *Systemes Asservis Lineaires d'Ordre Factionnaire: Theorie et Pratique*, Masson). Analiza wyników wielu eksperymentów pokazuje, że istnieje duża klasa systemów, których zachowanie w warunkach rzeczywistych



nie do końca jest wyjaśnione we właściwy sposób przez klasyczny rachunek różniczkowy. Często w ich opisie pojawia się nielokalna dynamika, której zachowanie można lepiej opisać za pomocą operatorów niecałkowitego rzędu. Powoduje to, że dziś rachunek niecałkowitego rzędu uważany jest za ważne narzędzie wykorzystywane, między innymi, do opisu i analizy zachowań systemów rzeczywistych, w szczególności systemów nieliniowych, a także opisu właściwości dziedzicznych.

Doktorant postawił sobie za cel zbadanie właściwości regulatorów niecałkowitego rzędu podczas pracy w nieliniowych systemach sterowania o szybko zmieniającej się dynamice, biorąc pod uwagę, jakość sterowania w stosunku do przyjętej funkcji kosztu oraz czas wykonania obliczeń. Do takich urządzeń można zaliczyć między innymi suwnicę 3D, dwutorowy system aerodynamiczny oraz wahadło matematyczne, które Doktorant wybrał jako obiekty do badań, w szczególności badań dotyczących szybkiego sterowania cyfrowego niecałkowitego rzędu. Biorąc pod uwagę fakt, że strojenie regulatora niecałkowitego rzędu jest zadaniem złożonym, podjęty przez Doktoranta problem jest niełatwym, ale też i interesującym zadaniem. Tezy postawione w pracy przez Pana mgr inż. Jakuba Żegleń-Włodarczyka mówią, że:

Teza 1: Regulator PID niecałkowitego rzędu (FOPID) może być zastosowany do sterowania szybkimi nieliniowymi systemami dynamicznymi.

Teza 2: Zastosowanie regulatora FOPID w większości sytuacji zapewnia lepszą jakość regulacji w sensie wybranych funkcji kosztu, niż w przypadkach klasycznych metod sterowania (regulator PID).

Teza 3: Algorytm regulatora FOPID może być zaimplementowany na platformie cyfrowej ze spełnieniem wymagań czasu rzeczywistego..

Zgodnie z moją wiedzą są to tezy oryginalne. Ich wykazanie prowadzi do stworzenia dobrej podstawy do praktycznych, w tym przemysłowych, implementacji rachunku niecałkowitego rzędu. Problematyka rozprawy jest aktualna zarówno z teoretycznego jak i praktycznego punktu widzenia.

2. Koncepcja i struktura rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska składa się z sześciu rozdziałów. Pierwszy z nich stanowi wstęp do rozprawy, a rozdział szósty – jej podsumowanie. Na końcu zamieszczono obszerną bibliografię zawierającą 231 pozycji z zakresu rachunku niecałkowitego rzędu i jego

aplikacji, metod aproksymacji, równań niecałkowitego rzędu, optymalizacji dobrze odzwierciedlających istniejący stan wiedzy.

W rozdziale drugim Doktorant przedstawiał podstawowe pojęcia i idee niezbędne do zrozumienia dalszej części rozprawy. Należy do nich zaliczyć definicje Grünwalda-Letnikova, Riemanna-Liouville'a, Caputo pochodnych niecałkowitego rzędu oraz relacje zachodzące między nimi, elementy rachunku operatorowego niecałkowitego rzędu, metody aproksymacji dedykowane do modelowania transmitancji niecałkowitego rzędu takich jak aproksymacja Oustaloupa, aproksymacja PSE (ang. *Power Series Expansion*) aproksymacje CFE (ang. *Continued Fractional Expansion*), regulator FOPID.

W rozdziale trzecim Doktorant szczegółowo omówił heurystyczne algorytmy optymalizacyjne: algorytm szarego wilka (ang. *Grey Wolf Optimizer* GWO), algorytm wieloryba (ang. *Whale Optimization Algorithm* WOA), algorytm optymalizacji roju cząstek (ang. *Particle Swarm Optimization* PSO).

W czwartym rozdziale są omówione obiekty laboratoryjne charakteryzujące się nieliniowością oraz stosunkowo szybko zmienną dynamiką, a wykorzystywane w dalszej pracy do testowania algorytmów regulacji. Są to suwnica 3D, dwutorowy system aerodynamiczny i układ wahadła odwróconego. Przedstawione są też modele matematyczne rozważanych obiektów.

W rozdziale piątym przedstawione są wyniki badań eksperymentalnych pokazujących działanie regulatorów FOPID podczas sterowania obiektami omówionymi w rozdziale czwartym. W każdym z rozpatrywanych przypadków Doktorant omówił praktyczną implementację sterowania w środowisku Matlab/Simulink, przy czym współczynniki regulatorów optymalizował przy użyciu algorytmu szarego wilka. We wszystkich rozważanych przypadkach, oprócz jakości sterowania pod względem zadanej funkcji kosztu, przeanalizowany został również czas wykonania obliczeń przez regulatory podczas wyznaczania sygnałów sterujących. Suwnica 3D jest obiektem wymagającym użycia pięciu regulatorów, przy czym ilość sygnałów wyjściowych została ograniczona do trzech. Dlatego też nastąpiła potrzeba odpowiedniego pogrupowania regulatorów. Doktorant rozważył dwa warianty sterowania, a w każdym z nich po trzy przypadki różniące się między sobą ilością regulatorów PID i FOPID. W dwutorowym systemie aerodynamicznym, ze względu na występujące sprzężenie krzyżowe, zostały zastosowane cztery regulatory. Doktorant rozważył dwa warianty sterowania: sterowanie równoległe i sterowanie hybrydowe (łączące sterowanie równoległe z kaskadowym), przy czym w każdym z wariantów przetestował trzy wersje różniące się między sobą ilością regulatorów PID i FOPID. W przypadku wahadła

odwróconego mamy tylko dwa regulatory. W związku z tym Doktorant przetestował trzy rodzaje układów sterowania: z dwoma regulatorami PID, z dwoma regulatorami FOPID oraz sterowanie łączące PID i FOPID.

3. Oryginalne osiągnięcia i znaczenie wyników Autora dla dyscypliny

Celem pracy było

1. implementacja algorytmu regulacyjnego FOPID na platformie Matlab/Simulink z wykorzystaniem aproksymacji Oustaloup'a;
2. opracowanie i zastosowanie metod dostrajania regulatora FOPID do konkretnego obiektu;
3. wykonanie testów symulacyjnych działania algorytmu FOPID w środowisku Matlab/Simulink na wybranych nieliniowych modelach obiektów;
4. weryfikacja doświadczalna zaimplementowanego algorytmu na stanowiskach laboratoryjnych, przy zwróceniu uwagi na jakość regulacji w sensie wybranych dla każdego z badanych obiektów funkcji kosztu, jak również zwrócenie uwagi na prędkość wykonywanych obliczeń podczas pracy systemu.

Do głównych osiągnięć przedstawionych przez Autora rozprawy należy zaliczyć:

- wykorzystanie algorytmów motywowanych naturą do strojenia regulatorów FOPID, w szczególności opracowanie metod strojenia regulatorów PID i FOPID a także ich kombinacji przy wykorzystaniu algorytmu optymalizacyjnego szarego wilka;
- eksperymentalną weryfikację opracowanych metod strojenia regulatorów FOPID przy wykorzystaniu algorytmu szarego wilka
- implementację regulatora FOPID na platformie cyfrowej przy spełnieniu wymagań czasu rzeczywistego;
- eksperymentalną weryfikację działania szybkiego sterowania cyfrowego niecałkowitego rzędu na wybranych obiektach o nieliniowej szybko zmiennej dynamice.

Dorobek naukowy Doktoranta obejmuje 12 publikacji współautorskich, z czego 2 to artykuły w periodykach takich jak *Electronics* oraz *Pomiary, Automatyka, Robotyka*, 7 rozdziałów w serii monografii *Advances Contemporary Control, Lecture Notes in Networks and System, Advances in Intelligent Systems and Computing, Towards Industry of the Future*,

wszystkie wydawnictwa Springer. Pozostałe publikacje to publikacje w materiałach cyklicznych konferencji międzynarodowych z zakresu automatyki takich jak na przykład *International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, indeksowanych w bazach Web of Sciences i Scopus.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy

Podczas analizy opiniowanej rozprawy nasuwają się pewne uwagi krytyczne wynikające między innymi ze złożoności rozważanego problemu pracy.

- Przedstawiona Bibliografia dobrze odzwierciedla istniejący stan wiedzy dotyczący tematu opiniowanej rozprawy. choć też rodzi pytanie o to, czy Doktorant faktycznie zapoznał się ze wszystkimi wymienionymi źródłami. Przydałby się też szerszy, bardziej dogłębny przegląd literatury z zakresu problematyki podjętej w rozprawie.
- Do celów optymalizacyjnych w rozdziale piątym jest użyty algorytm szarego wilka. Dwa pozostałe algorytmy (algorytm wieloryba i algorytm optymalizacji roju cząstek), jak to Autor wspomina, są przedstawione „w celu umożliwienia porównania ich własności”. Niestety takiego wyraźnego porównania w pracy zabrakło.
- Dlaczego a w (3.3) powinno liniowo zmieniać się od 2 do 0?
- Sposób implementacji algorytmu szarego wilka celem dostrojenia regulatorów w każdym z trzech rozważanych obiektów mógłby być szerzej opisany.
- Tabela 5.2, wariant 3: λ i μ bardzo niewiele różnią się od 1. Jakie różnice między użyciem regulatora FOPID i PID w wariacie 3 wynikają z przyjęcia $\lambda = 0,99$ oraz $\mu = 0,99$.
- Funkcja gamma (str 27) jest określona na dziedzinie zespolonej, a nie jak tylko dla dodatnich liczb rzeczywistych.

Inne uwagi, w tym uwagi edycyjne:

- Wzór (2.3) jest prawdziwy dla m naturalnego a nie całkowitego.
- λ i μ występujące we wzorze (2.46) powinny być dodatnie (opuszczone założenie).
- Założenia pierwsze i trzecie w podrozdziale 4.2.3 są oczywiste i mogą być pominięte.
- Nieprecyzyjne oznaczenia, np. w (3.7) brakuje argumentu t po prawej stronie wzoru, opuszczony indeks w $|A| < 1$ (str. 39), A , C występujące na str. 41 raz jest opisane jako współczynnik, a zaraz potem jako wektor, natomiast ze wzorów (3.10)-(3.11) wynika, że są to liczby: co oznacza D we wzorze (3.9)?

- Autor w tekście naukowym używa potocznego słownictwa, np. twardey czas rzeczywisty (str. 47), „obliczenia wykonane do stanów, które są już nieaktualne (str. 47), „mona ułożyć następujący układ równań” – chodzi tu raczej o definiowanie zmiennych (str. 50),

5. Podsumowanie recenzji i wniosek końcowy

Przedstawiona rozprawa doktorska jest interesującą i ważną próbą wykorzystania operatorów niecałkowitego rzędu do szybkiego sterowania cyfrowego obiektami nieliniowymi o stosunkowo szybko zmieniającej się dynamice. Zastosowanie pochodnych niecałkowitego rzędu jest tu sporym wyzwaniem, między innymi ze względu na trudności wynikające ze strojenia regulatorów (klasyczne metody w przypadku regulatorów FOPID nie sprawdzają się). Doktorant do ich strojenia zaproponował wykorzystanie algorytmów motywowanych naturą, a w szczególności wykorzystał algorytm szarego wilka. Wyniki przeprowadzonych testów eksperymentalnych i analiz dokonanych na ich podstawie pokazują, że implementacja regulatora FOPID na platformie cyfrowej przy spełnieniu wymagań czasu rzeczywistego nie tylko jest możliwa, ale i może dać lepsze efekty niż implementacja regulatora PID.

Praca została skomponowana poprawnie, wykazuje, że Doktorant posiada podstawową oraz rozszerzoną wiedzę i odpowiednie kompetencje w zakresie rachunku niecałkowitego rzędu i jego implementacji w układach i systemach automatyki, ze szczególnym zwróceniem uwagi na implementacje cyfrowe, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Otrzymane w rozprawie wyniki pokazują, że została ona wykonana w obszarze dyscypliny **automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne**, postawiony cel został osiągnięty, a tezy wykazane. Należy dodać, że przedstawione w poprzednim punkcie uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają pozytywnej oceny opiniowanej rozprawy doktorskiej.

W związku z przedstawioną powyżej oceną rozprawy doktorskiej stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. *Szybkie sterowanie niecałkowitego rzędu obiektami nieliniowymi* spełnia wymogi określone przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2023 poz.595 poz. 742). Wnioskuje o dopuszczenie Pana mgr inż. Jakuba Żegleń-Włodarczyka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

