

dr hab. inż. Rafał Stanisławski, prof. uczelni
Katedra Informatyki
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Politechnika Opolska
e-mail: r.stanislawski@po.edu.pl

Opole, 15.01.2024
SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 30.01.2024

Zarejestrowano pod nr

Podpis

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy:

Szybkie sterowanie niecałkowitego rzędu obiektami nieliniowymi

Autor rozprawy: mgr inż. Jakub Żegleń-Włodarczyk
Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Krzysztof Oprzędkiewicz
Promotor pomocniczy: dr inż. Maciej Rosół

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica, dra hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH, z 27 października 2022 roku.

1. Zawartość pracy i ocena formalna

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska zawiera łącznie 139 stron podzielonych na sześć rozdziałów, literatury liczącej 231 pozycji, streszczeń przedstawionych w języku polskim i angielskim oraz spisów rysunków i tabel. Dysertacja została napisana w języku polskim. Zawartość rozprawy zaprezentowano poniżej.

W rozdziale pierwszym przedstawiono krótkie wprowadzenie do zagadnień poruszanych w pracy oraz omówiono aktualny stan wiedzy w wybranych aspektach rachunku niecałkowitego rzędu. Scharakteryzowano w nim kontekst pracy oraz zaprezentowano szczegółowo obszar, zakres i strukturę dysertacji. W rozdziale pierwszym sformowano również trzy tezy pracy oraz określono zadania do wykonania.

W rozdziale drugim omówiono wybrane preliminaria matematyczne w szczególności odnoszące się do rachunku niecałkowitego rzędu. W pierwszej kolejności przedstawiono podstawowe definicje związane z rachunkiem niecałkowitego rzędu, omówiono zależności między różnymi definicjami operatorów frakcyjnych oraz zaprezentowano transformatę Laplace'a dla rachunku niecałkowitego rzędu. W rozdziale przedstawiono również wybrane aproksymacje pochodnych i całek niecałkowitego rzędu, zarówno w przypadku ciągłym (metoda *Oustaloup'a*) jak i dyskretnym (metody *Power Series Expansion* i *Continued Fraction Expansion*) oraz przedstawiono frakcyjną wersję regulatora PID. Rozdział ten ma charakter teoretyczny.

Rozdział trzeci szczegółowo opisuje trzy wybrane metody optymalizacyjne obejmujące: *Grey Wolf Optimizer*, *Whale Optimization Algorithm* i *Particle Swarm Optimization*. W szczególności

skupiono się na *Grey Wolf Optimizer*, który jest wykorzystywany w dalszych częściach dysertacji. Podobnie jak rozdział drugi, rozdział trzeci ma charakter teoretyczny.

Modele matematyczne obiektów sterowania, które są rozważane w dysertacji przedstawiono w rozdziale czwartym. Omówiono w nim trzy laboratoryjne obiekty sterowania opracowane przez firmę INTECO obejmujące: suwnicę pomostową, dwurotorowy system aerodynamiczny oraz układ waha-dła odwróconego. Nieliniowe modele dynamiczne ww. procesów zostały przedstawione w oparciu o klasyczne zależności fizyczne. Rozdział powstał na podstawie literatury przedmiotu i ma charakter teoretyczny.

Rozdział piąty przedstawia wyniki związane z implementacją i badaniem frakcyjnych wersji regulatorów PID (FOPID) dla obiektów regulacji przedstawionych w rozdziale czwartym. Do optymalizacji zastosowano *Grey Wolf Optimizer*, a aproksymację operatora niecałkowitego rzędu zrealizowano metodą *Oustaloup'a*. Dla każdego z obiektów poddano analizie porównawczej kilka wersji regulatorów FOPID i kombinacji regulatorów PID i FOPID działających zarówno w torach głównych, jak również skrośnych. W rozdziale omówiono również szczegółowo wyniki z przeprowadzonej analizy pracy poszczególnych regulatorów. Rozdział piąty ma charakter praktyczny i stanowi główny wkład Doktoranta w recenzowaną rozprawę doktorską.

W rozdziale szóstym zostało zawarte podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań, wraz z odniesieniem do postawionych tez dysertacji. W rozdziale przedstawiono również kierunki potencjalnych przyszłych prac Doktoranta.

Układ pracy jest poprawny. Treści dysertacji zostały logicznie podzielone na poszczególne rozdziały pracy. Układ i zakres poszczególnych rozdziałów, podrozdziałów i sekcji nie budzi żadnych wątpliwości Recenzenta.

Warta podkreślenia jest dobra strona edycyjna pracy. Rozdziały, podrozdziały, sekcje, nagłówki, stopki itp. utrzymane są w tej samej konwencji, przez co praca bardzo dobrze wygląda. Rysunki są bardzo starannie przygotowane z dbałością o estetyczne i precyzyjne przedstawienie graficzne zastosowanych algorytmów i wyników badań. Język użyty w pracy jest czytelny i precyzyjny, przez co pracę czyta się dobrze. Rozprawa jest również dokładnie opracowana redakcyjnie. Nieliczne błędy typograficzne i stylistyczne zostały wypunktowane w dalszej części recenzji.

2. Ocena merytoryczna pracy

Problematyka związana z modelowaniem procesów oraz projektowaniem układów regulacji z zastosowaniem rachunku niecałkowitego rzędu nie jest zagadnieniem nowym, jednak w ciągu ostatnich dwóch dekad można zauważyć prawdziwą eksplozję zainteresowania tą tematyką. Jest to spowodowane tym, że modele oparte na rachunku niecałkowitego rzędu mogą lepiej opisywać niektóre procesy fizyczne, a układy regulacji oparte na rachunku niecałkowitego rzędu mogą cechować się większą dokładnością i odpornością w porównaniu do układów "klasycznych". W obszarze związanym z projektowaniem układów regulacji najbardziej popularnym kierunkiem są prace nad frakcyjnymi wersjami regulatorów PID. Jednak należy zauważyć, że rachunek niecałkowitego rzędu generuje dodatkowe problemy implementacyjne związane przede wszystkim z faktem, że pochodna niecałkowitego rzędu jest, w sensie asymptotycznym, nieimplementowalna. Dlatego występuje konieczność jej aproksymacji za pomocą modeli, które są zwykle dość złożone obliczeniowo. W przypadku praktycznej implementacji regulatorów frakcyjnych występuje problem pogodzenia dwóch przeciwstawnych in-

K. J.

teresów tj. dokładności aproksymacji i jej złożoności obliczeniowej. Ponadto również w przypadku regulatorów FOPID występuje zawsze pytanie, czy (i ewentualnie na ile) takie podejście w konkretnej implementacji jest bardziej efektywne od klasycznych regulatorów PID. Recenzowana dysertacja lawiruje między dwoma ww. zagadnieniami i porusza zarówno aspekty implementacyjne, jak również dokonuje analizy efektywności regulatorów FOPID dla wybranych procesów fizycznych.

W związku z powyższym Autor podejmuje pracę w ważnym i aktualnym obszarze badań, który ma swoje podstawy w światowej literaturze naukowej, jak również daje możliwości osiągnięcia nowych, istotnych wyników szczególnie w ujęciu praktycznym. Recenzent jednoznacznie umiejscawia przedmiotową dysertację w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne* w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych.

Autor przedstawił sobie cel opracowania frakcyjnych wersji regulatorów PID w oparciu o implementację operatorów niecałkowitego rzędu zaproponowaną przez Oustaloupa oraz przy wykorzystaniu wybranych metod optymalizacyjnych. Autor postawił następujące trzy tezy pracy:

- 1) **Regulator PID niecałkowitego rzędu (FOPID) może być zastosowany do sterowania szybkimi nieliniowymi systemami dynamicznymi.**
- 2) **Zastosowanie regulatora FOPID w większości sytuacji zapewnia lepszą jakość regulacji, w sensie wybranych funkcji kosztu, niż w przypadku klasycznych metod sterowania (regulator PID).**
- 3) **Algorytm regulatora FOPID może być zaimplementowany na platformie cyfrowej ze spełnieniem wymagań czasu rzeczywistego.**

Chociaż postawione tezy pracy zostały sformułowane poprawnie, to jednak teza pierwsza budzi drobne wątpliwości Recenzenta. Teza ta dotyczy 'szybkich dynamicznych układów nieliniowych', których 'szybkość' nie została precyzyjnie określona. Choć można się umówić, że rozpatrywane w dysertacji układy są relatywnie szybkie w zestawieniu z innymi układami mechanicznymi, to jednak w zestawieniu z wieloma innymi procesami (np. elektrycznymi) takimi już nie są.

W celu dowiedzenia ww. tez pracy sformułowano cztery główne zadania badawcze. Zawartość rozprawy, opisana w poprzednim punkcie recenzji, wynika bezpośrednio ze sformuowanych zadań i prowadzi do dowiedzenia przedstawionych powyżej tez dysertacji. Do podstawowych osiągnięć dysertacji można zaliczyć:

- Implementację frakcyjnych regulatorów PID z wykorzystaniem rekursywnej aproksymacji Oustaloupa w środowisku Matlab/Simulink.
- Zaproponowanie różnych wersji regulatorów FOPID oraz implementacja metod strojenia parametrów poszczególnych regulatorów w oparciu o metody optymalizacyjne (w szczególności *Grey Wolf Optimizer*) dla trzech obiektów tj, suwnica pomostowa, dwurotorowy system aerodynamiczny oraz układ wahadła odwróconego.
- Przeprowadzenie badań symulacyjnych działania algorytmów regulacji opartych na FOPID dla rozpatrywanych obiektów.
- Weryfikacja doświadczalna opracowanych algorytmów na stanowiskach laboratoryjnych. Przeprowadzenie badań zarówno w kontekście jakości regulacji, jak również analiza kosztochłonności obliczeniowej z punktu widzenia wymagań systemów operacyjnych czasu rzeczywistego.

R.PL

Finalnie w ramach pracy powstały nowe, oryginalne wyniki związane z implementacją i analizą efektywności regulacji frakcyjnych wersji regulatorów PID. Osiągnięte rezultaty pokazują, że a) opracowane algorytmy regulacji cechują się wysoką efektywnością w regulacji nieliniowymi układami dynamicznymi oraz b) mogą z powodzeniem być implementowane na stosunkowo prostych układach czasu rzeczywistego. Należy to zaliczyć do istotnych osiągnięć praktycznych pracy.

Pomimo pewnych (w większości drobnych) uwag Recenzenta do niektórych wyników prezentowanych w dysertacji, które zawarto w części czwartej niniejszej recenzji, należy jednoznacznie stwierdzić, że wszystkie wyżej wymienione osiągnięcia są znaczące i stanowią istotny wkład Kandydata w rozwój dyscypliny *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne* oraz finalnie doprowadziły do osiągnięcia celów pracy. Ponadto otrzymane w dysertacji wyniki jednoznacznie udowadniają postawione tezy.

Generalnie praca ma charakter praktyczny. Główny wkład Kandydata stanowi rozdział piąty, który łącząc rozważania teoretyczne przedstawiane w rozdziałach trzecim i czwartym realizuje wszystkie zadania badawcze pracy. Pewnych nowych wyników teoretycznych należy upatrywać w rozdziałach trzecim i czwartym.

3. Analiza źródeł, pozycja rozprawy, znaczenie wyników Autora, umiejętność przedstawiania wyników

Motywacja dla podjęcia tematu rozprawy wyniknęła z dobrze przeprowadzonej przez Autora analizy literatury przedmiotu, liczącej 231 pozycji. Dzięki szerokiej analizie literaturowej został poprawnie odzwierciedlony aktualny stan wiedzy na temat wszystkich zagadnień podejmowanych w pracy.

Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy reprezentowanej w literaturze światowej jest dobra. Autor dysertacji jest współautorem jednego artykułu w czasopiśmie indeksowanym na liście JCR tj. *Electronics* oraz kilku referatów na konferencjach międzynarodowych tj. *IEEE International Conference on Methods & Models in Automation Robotics, Automation* oraz *International Conference on Fractional Differentiation and its Application*. Dorobek publikacyjny Doktoranta spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim, a aktywność publikacyjną Kandydata należy uplasować w okolicach wartości średniej.

Autor posiadał umiejętność poprawnego, przekonującego i precyzyjnego przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników. Zarówno rozprawę, jak również artykuły Doktoranta cechuje zwięzłość, jasność języka oraz precyzja.

4. Wady rozprawy, słabe strony, uwagi i pytania

Należy podkreślić, że poziom merytoryczny ocenianej dysertacji jest dobry i Recenzent nie dostrzegł w niej istotnych wad i niedostatków. Jednak warto wskazać na pewne, w większości drobne uchybienia oraz niejasności. Uwagi zostały wypunktowane i podzielone na dwie grupy, a) uwagi dyskusyjne i pytania oraz b) drobne uchybienia typograficzne i stylistyczne.

Uwagi dyskusyjne i pytania:

- 1) Strona 28, równanie (2.8). Równanie jest prawdziwe tylko przy spełnieniu pewnych dodatkowych warunków, które nie zostały przedstawione w pracy. Pytanie do Doktoranta jakich?

- 2) Strona 60, równanie (5.1). Pewne wątpliwości budzi zaproponowana funkcja kosztu. W szczególności fakt, że wszystkie uchyby i kąty mają tą samą wagę. Pytanie w jakich jednostkach reprezentowane są odległości i kąty? Zwrócić należy uwagę, że w przypadku wskazywania kątów w radianach ta sama zależność będzie prowadziła do zupełnie innej funkcji kosztu niż w przypadku, kiedy kąt będzie opisany w stopniach. Ponadto nasuwa się wątpliwość dlaczego nie uwzględniono w funkcji kosztu sygnałów sterujących? Prowadzić to może do 'ślepego' obniżania uchybów regulacji kosztem zbyt wysokich nastaw regulatora i finalnie wielkości sygnałów sterujących. W pewnym sensie omawiany sygnał sterujący został uwzględniony w wahadle odwróconym (równanie (5.5)). Dodatkowe pytanie, jak uwzględniono ograniczenia na sygnał sterujący?
- 3) W pracy nie przedstawiano przebiegów sygnałów sterujących w żadnym z opisywanych układów, a ich wartości również dają informację na temat jakości regulacji. Czy Doktorant mógłby przedstawić te przebiegi dla wybranych scenariuszy?
- 4) Poruszany w pracy problem optymalizacji jest dość złożony i wymaga wyznaczenia dość znacznej ilości elementów. W niektórych przypadkach jest ich aż 25 (suwnica 3D). Czy Doktorant natknął się na problemy związane z minimami lokalnymi? Jeśli tak to jak sobie z nimi poradził?
- 5) W rozdziale trzecim Autor opisuje trzy wybrane algorytmy optymalizacji tj. *Grey Wolf Optimizer*, *Whale Optimization Algorithm* i *Particle Swarm Optimization*. Natomiast w zadaniach praktycznych stosowana jest wyłącznie metoda *Grey Wolf Optimizer*. Wybór został dokonany *a-priori* bez analizy efektywności algorytmów w rozpatrywanym w pracy zastosowaniu. Dlaczego wybór padł akurat na tą metodę?
- 6) W pracy Doktorant przedstawił szereg wykresów czasu wykonania poszczególnych wariantów regulatorów. Np. Rysunki 5.39-5.50, 5.58-5.69, 5.81-5.84. Pewną wątpliwość budzi stochastyczny charakter tych przebiegów. Przecież liczba operacji procesu wyznaczenia wartości wejściowej do obiektu przez regulator FOPID ma charakter deterministyczny i jest ściśle określona (można ją z łatwością wyliczyć). Zmienny charakter tego czasu jest raczej skutkiem innych czynników systemowych. Czy Doktorant zastanawiał się nad tym zagadnieniem?
- 7) W rozdziale czwartym w modelach matematycznych procesów Doktorant używa sporą ilość stałych jak np. k_1 , k_2 , k_4 (Suwnica 3D), k_{hv} , k_{vh} , a_1 , a_2 (TRAS), F_e , F_f (wahadło). W pracy brakuje informacji jak te parametry zostały dobrane. Stąd nasuwa się pytanie, czy Autor użył wartości zaproponowane przez producenta stanowiska, czy dobierał je samodzielnie np. metodą strojenia modelu?

Drobne uchybienia, w tym typograficzne i stylistyczne:

- Strona 34, równanie (2.38). Wygląda na to, że Autor nie zadbał o konsekwencję w oznaczeniach w równaniu.
- Strona 34, równanie (2.41). Brak konsekwencji w oznaczeniu czasu próbkowania (czasem h , czasem T).
- Strona 47. Określenie 'twardy czas rzeczywisty' można by było lepiej sformułować.

- Strona 48, linia 13. Błąd stylistyczny.
- Strona 51, początek podrozdziału 4.2. Przyrównanie modelu TRAS do zminiaturyzowanej wersji helikoptera jest nieco naciągane.
- Strona 107. Brak konsekwencji przy podawaniu wartości liczbowych w tekście. Czasem są podawane z kropką a czasem bez.

Należy podkreślić, że przedstawione powyżej uwagi, mają w większości charakter dyskusyjny i w związku z tym nie obniżają pozytywnej oceny pracy.

5. Podsumowanie recenzji i wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi, zdaniem Recenzenta, oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego oraz wykazuje dużą ogólną wiedzę teoretyczną i aplikacyjną Kandydata w dyscyplinie naukowej *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*, a także Jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zatem stwierdzam, że **rozprawa mgra inż. Jakuba Żegleń-Włodarczyka spełnia** kryteria stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.).

W związku z powyższym, uwzględniając oryginalność rozwiązania problemu naukowego przedstawionego w rozprawie, specjalistyczną wiedzę Kandydata oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej **wnoszę o dopuszczenie mgra Jakuba Żegleń-Włodarczyka do dalszych etapów przewodu doktorskiego** w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*.

Ryśko Stanisławski