prof. dr hab. inż. Piotr Ostalczyk
Instytut Informatyki Stosowanej
Politechnika Łódzka

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
DZIEKANAT
Wpł. 04 -12- 2019
Rektor Politechniki Poznańskiej
prof. dr hab. inż. Tomasz Łodygowski
z up. prof. dr hab. inż. Andrzej Kasiński
Dziekan

Łódź, dnia 2 grudnia 2019

Opinia

rozprawy doktorskiej mgra inż. Talara Sadalla pt.:
„Application of selected optimization algorithms for anti-windup compensation and synthesis of fractional-order controllers"
(opinia została sporządzona na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej z dnia 24 września 2019 roku)

Ocena tematyki, zakresu i celu rozprawy

Tematem recenzowanej pracy są badania układów dynamicznych ze sprzężeniem zwrotnym, w których liniowy obiekt opisany jest liniowym równaniem różniczkowym z opóźnieniem a regulator, głównie typu PI charakteryzuje niecałkowity rząd całkowania. Choć pierwsze prace dotyczące tego typu regulatorów pojawiły się około dwadzieścia lat temu, a sam rachunek różniczkowy niecałkowitych rzędów datuje się listem de l'Hospitala do Leibnitza z 1695 roku, to ciągle w Polsce jest „opozycja inżyniersko - matematyczna" przeciwko temu narzędzi matematycznemu. Dlatego tematykę podjętą przez Autora uważam za ważną, w kontekście stwierdzenia nieżyjącego już Katsuyuki Nishimoto – pioniera ww rachunku: „Rachunek różniczkowo – całkowy niecałkowitego rzędu będzie rachunkiem XXI wieku". To już się staje, a tylko naśladowcy ówczesnych niedowiarków „w podział atomu czy działania szczepionek chroniących przed zaraźliwymi chorobami" nadal beznadziejnie zwalczają ten aparat matematyczny. Dlatego pracę mgr inż. Talara Sadalli uważam za cenną w Polsce, bo Świat Naukowy już ten rachunek uznał. Istotnym elementem pracy jest uwzględnienie zjawiska interakcji efektów całkowania uchybu z nasyceniem sygnału sterującego (ang. Anti-windup) w czterech wersjach rozwiązań, które ogólnie można określić mianem „inteligentnego całkowania". Choć idea ta jest dość stara, to ciągle pojawiają się nowe propozycje rozwiązań. Zastosowanie rachunku różniczkowo całkowego niecałkowitych rzędów jest ciekawą ideą inżynierską i dlatego stwierdzam, że tematyka pracy jest bardzo aktualna i wybór tematu rozprawy uważam za bardzo ważny gdyż Nauka Polska stanowi silne, zauważane w świecie naukowym centrum badań dotyczących rachunku różniczkowo – całkowego niecałkowitych rzędów.

Ocena merytoryczna rozprawy

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Talara Sadalli napisana jest na dobrym poziomie merytorycznym. Praca składa się z czterech logicznie ułożonych rozdziałów zakończonych krótkimi podsumowaniami oraz ostatnim piątym stanowiącym końcowe konkluzje oraz wytyczne dalszych badań. Rozdział pierwszy stanowi bardzo krótka informacja o motywach wyboru tematyki oraz sformułowana została jedna dość długa teza:

„The selected optimization algorithms with synthesis of fractional-order controllers with antiwindup compensaction provide better tracking performance than the integer-order controllers with anti-windup compensaction". W pozostałych rozdziałach Autor sukcesywnie udowadnia jej prawdziwość. W tym miejscu należy zaznaczyć, że wyniki badań, zawarte w rozprawie zostały już opublikowane w 5 współautorskich pracach opublikowanych w czasopismach oraz 2 w referatach konferencyjnych. Przegląd aktualnego stanu wiedzy jest dość skąpy, ale zawiera rzetelne informacje o aktualnym stanie wiedzy. W rozdziale drugim, zawierającym definicję najbardziej popularnej pochodnej niecałkowitego rzędu Riemanna-Liouville'a (tutaj powinna znaleźć się wzmianka o całce niecałkowitego rzędu) przedstawione zostały skrótowo, w oparciu o cytowana literaturę. Dotyczy to również metod aproksymacji pochodnej niecałkowitego rzędu (Oustaloupa, Carlsona, Matsudy, oraz rozwinięcia w szereg). Na podstawie rezultatów symulacji dla regulatora FOPD Autor ostatecznie decyduje się ograniczyć do badań regulatora FOPI.

Teza recenzowanej rozprawy została wykazane w sposób logiczny i jasny. Uważam, że Autor rozwiązał postawione przez siebie zagadnienie używając właściwych metod. Istotnym elementem pracy jest poparcie rozważań teoretycznych badaniami rzeczywistego obiektu oraz porównanie pomiarów z przebiegami otrzymanymi na drodze symulacji komputerowych modeli matematycznych. Praca napisana jest w języku angielskim.

Do podstawowych oryginalnych osiągnięć Autora zaliczam:

- Określenie zakresów stabilności układu zamkniętego z regulatorem PI o niecałkowitym rzędzie całkowania przy wykorzystaniu twierdzeń Hermite'a – Biehlera oraz Pontryagina.

- Analiza dynamiki układu zamkniętego z regulatorem PI niecałkowitego rzędu w oparciu o kryteria ISE oraz IAE.

- Analiza dynamiki układu zamkniętego z regulatorem PI niecałkowitego z różnymi wariantami systemu anti-windup rzędu w oparciu o kryteria ISE oraz IAE

- Zastosowanie trzech metod optymalizacji: metody złotego podziału, roju cząstek oraz liniowych nierówności macierzowych (ang Linear Matrix Inequality (LMI) do określenia sześciu parametrów regulatora niecałkowitego rzędu.

- Potwierdzenie prawdziwości wyników otrzymanych drogą symulacji komputerowych z wynikami eksperymentalnymi przeprowadzonymi na rzeczywistym obiekcie - układzie napędowym z mikrosilnikiem prądu stałego.

Autor zamieścił w pracy odwołania do 92 pozycji literatury, z których dwóch jest autorem, oraz współautorem dwudziestu czterech, w tym trzech autorem głównym (czyli razem dwudziestu trzech). Recenzowana praca zawiera zatem głównie rezultaty opublikowanych wcześniej prac. Cytowana literatura odnosi się do najnowszych pozycji dotyczących rozważanego zagadnienia. Świadczy to o dobrej znajomości literatury w zakresie dotyczącym tematyki zagadnienia, choć według recenzenta brakuje cytowania kilku fundamentalnych prac, co nie dziwni w sytuacji ogromu ukazujących się prac z dziedziny rachunku różniczkowo – całkowego niecałkowitych rzędów, które corocznie od 40 lat ukazują się na świecie. Praca liczy 115 stron.

Uwagi krytyczne rozprawy

W trakcie czytania opiniowanej pracy nasunęły mi się następujące uwagi krytyczne ogólne, w części będące raczej uwagami inspirującymi do dalszych badań.

- Opis obiektu rzeczywistego. Z rysunku 2.4 wynika, że są trzy silniki napędzające śmigła. Czy układ ma trzy niezależne, zamknięte układy napędowe z trzema regulatorami prędkości obrotowej? Czy sygnałem sprzężenia zwrotnego jest prędkość obrotowa? Z dalszej części pracy wynika jednak, że badany jest układ pojedynczego silnika bez śmigła. Należy to skomentować.

- W paragrafie 2.5.3 opisany jest „Inteco Modular Servo System" przy czym w modelu nie ma śmigła tylko obciążenie w postaci momentu bezwładności. Autor wspomina na stronie 27 o nieliniowej charakterystyce statycznej, która zostaje skompensowana. Tutaj brak jest szczegółowego opisu tej procedury. Jak jest też wpływ pominięcia indukcyjności uzwojenia twornika silnika?

- Moment oporowy wywierany na śmigła jest silnie nieliniowy w funkcji prędkości obrotowej. Jakie jest odniesienie do przyjętego modelu liniowego z opóźnieniem (wzór 2.34)? Na rysunku 2.5 pokazany został (niewątpliwie unormowany, bo brak jest jednostek określających osie wykresu) przebieg odpowiedzi jednostkowej $h(t)$. Warto byłoby podać transformaty Laplace'a sygnałów określających transmitancję $G(s)$. Czy to prędkość obrotowa? Autor przyjmuje model liniowy z opóźnieniem wyrażony wzorem (2.34). Tego opóźnienia nie widać jednak na pomierzonym przebiegu.

- Do badania stabilności układu zamkniętego wykorzystuje Autor twierdzenia Hermite'a – Biehlera oraz twierdzenie Pontryagina. Brak jest komentarza do znanego od lat twierdzenia Matignona o stabilności liniowych układów ułamkowych, które wydaje się znacznie prostsze w zastosowaniach badania stabilności.

- W rzeczywistym układzie niewątpliwie jest dyskretny pomiar prędkości. Jak mierzona jest prędkość. Rozpatrywany regulator FOPI jest zatem regulatorem dyskretnym. Obecnie, w „świecie dyskretnym" wykorzystywane są wyłącznie urządzenia dyskretne (sterowniki PLC, mikrokonrolery). Czy rozważane systemy anty-windup realizowane są programowo?

- Na stronach 15 – 18 Autor podaje krótkie opisy metod aproksymacji pochodnej niecałkowitego rzędu (Oustaloupa, Matsudy, Carlsona). Brak jest czytelnej informacji, która metoda i gdzie została zastosowana w pracy

- Brak jest wyjaśnienia kiedy ma przewagę jedno kryterium (IAE, ISE) nad drugim. Które z nich prowadzi do lepszych rezultatów w postaci np. szybszego czasu ustalania się przebiegów, czy przeregulowania.

- W zastosowanej metodzie optymalizacji za pomocą liniowej nierówności macierzowej (ang. Linear Matrix Inequality), po podaniu dość szczegółowego opisu metody, w której określić należy parametry, w tym macierze $\boldsymbol{A}, \boldsymbol{P}, \boldsymbol{\Gamma}$ oraz współczynnika δ brak jest podania ich wartości w rozpatrywanym przypadku. Gdzie uwzględnione jest opóźnienie (wzór 4.47) w opisie za pomocą zmiennych stanu (4.11)?

- Warto byłoby podać zbiorczy komentarz dotyczący otrzymanych wyników za pomocą różnego typu wariantów systemu wind-up rozważanego w rozdziale trzecim.

- Warto byłoby zamieścić zbiorczy komentarz dotyczący procesu optymalizacji nastaw regulatora przy wykorzystaniu zaproponowanych metod. Którą Autor preferuje. Jakie były czasy poszukiwania optymalnych nastaw?

1. Uwagi szczegółowe

Praca zawiera relatywnie mało błędów redaktorskich. Mam też kilka drobnych uwag i komentarzy. Niektóre wymieniam poniżej:

- Na stronie 13, we wzorze (2.13) Autor rząd oznacza przez m. Zazwyczaj w rachunku różniczkowym niecałkowitych rzędów, do podkreślenia, że nie jest to rząd całkowity używa się małych liter greckich. Dotyczy to w szczególności postaci pochodnej Riemanna – Liouville'a, gdzie występuje jednocześnie rząd całkowity i niecałkowity.

- Na tej samej stronie brak jest jasnego określenia po jakiego rodzaju pochodną chodzi.

- Na stronie 23, Autor otrzymuje ujemne wartości współczynnika K_D. Na przedstawionych powierzchniach brak jest określenia extremum absolutnego. Jak należy rozumieć wartości odpowiadające kolorom.

- Autor odwołuje się do wzorów, czy wyników, które prezentuje w dalszej części tekstu. To zmniejsza czytelność tekstu (str. 29).

- Dlaczego parametr lambda jest przedstawiany w postaci ilorazu a/b (str.34 i dalej)?

- Autor zajmuje się głównie określeniem optymalnych, według przyjętego kryterium nastaw regulatora, który ma zapewniać śledzenie sygnału zadającego. W regulacji bardzo ważna jest również eliminacja zewnętrznych zakłóceń. Wydaje się, że aparat matematyczny i oprogramowanie pozwoliłoby na relatywnie szybkie rozwiązanie tego problemu. Jaka byłaby zmiana układu i nastaw regulatorów? To nie uwaga, ale raczej sugestia prowadzenia dalszych badań.

- W jaki sposób określone zostały kontury (zaznaczone linią czarną) na rysunkach 2.8 – 2.10? jaka metod została zastosowana? Brak jest informacji o algorytmie określającym kontury. Czy algorytm jest oryginalnym osiągnięciem Autora? Jaki program komputerowy został użyty?

- O ile rysunki 2.8 – 2.10 wykazują pewną „ciągłość" kształtu powierzchni, to rysunki 2.6 i 2.7 różnią się znacznie. Co powoduje tak drastyczną zmienność kształtu powierzchni. To wymaga komentarza

- Jak określone zostały punkty na rysunkach 2.20 – 2.24

- Wykresy na rysunkach 4.41 – 4.47 są mało czytelne, szczególnie oznaczenia kolorów przebiegów oraz związanych z nimi rzędów. Ich powiększenie skutkowałoby, niezauważalnym wzrostem kosztów druku pracy

- Symbol D z ostatniego wiersza strony 85 powinien być wprowadzony wcześniej

Wspomniane wyżej uwagi nie mają wpływu na moją pozytywną ocenę całości rozprawy, tym samym nie powodują konieczności zmian lub uzupełnień w pracy. Poza nielicznymi sformułowaniami skrótowymi praca napisana jest w sposób jasny. Wyniki przedstawione są w sposób jednoznaczny Trzeba podkreślić, że zdecydowana większość pracy została już zrecenzowana w postaci wcześniejszych publikacji.

Uważam, że rozprawa doktorska mgra inż. Talara Sadalla, poświęcona aktualnej i ważnej problematyce w dziedzinie zastosowań inżynierskich rachunku różniczkowo-całkowego niecałkowitych rzędów, zawierająca oryginalne rozwiązania autora spełnia warunki określone w art. 13 ust.1 i ust.2 Ustawy "O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki" z dnia 14 marca 2003r (Dz. U. Nr 65, poz.595, z późniejszymi zmianami).

Na podstawie przedstawionej powyżej pozytywnej oceny pracy wnioskuję do Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie mgr inż. Talara Sadalla do jej publicznej obrony.

Piotr Ostalczyk

prof. dr hab. inż. Piotr Ostalczyk