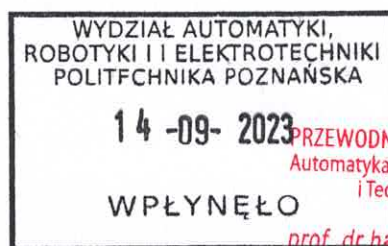




dr hab. inż. Tomasz Tarczewski, prof. UMK
Katedra Automatyki i Systemów Pomiarowych
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń

Toruń, 10 września 2023 r.



PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Bartłomieja Wichra
pt.: **Sterowanie nieliniowych układów mechanicznych z wykorzystaniem
metody aktywnej kompensacji zakłóceń (ADRC)**

1. Podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra inż. Bartłomieja Wichra z Instytutu Robotyki i Inteligencji Maszynowej Politechniki Poznańskiej, pod tytułem *Sterowanie nieliniowych układów mechanicznych z wykorzystaniem metody aktywnej kompensacji zakłóceń (ADRC)*. Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej, Pana prof. dra hab. inż. Wojciecha Szelaąga z dnia 6 lipca 2023 r. Recenzja ma być wykorzystana w postępowaniu o nadanie mgr. inż. Bartłomiejowi Wichrowi stopnia naukowego doktora w zakresie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka i robotyka, która obecnie mieści się w zakresie dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

2. Wprowadzenie

W przemyśle istnieje wiele układów napędowych, w których silnik elektryczny jest połączony z elementem wykonawczym poprzez połączenie sprzężyste. Rozwiązania takie można spotkać m.in. w napędach walcarek i anten kosmicznych, ramionach robotów, systemach przepustnic. Skończona sztywność wału, luzy mechaniczne, nieliniowe tarcie oraz niepewność parametrów są czynnikami wpływającymi niekorzystnie na jakość regulacji prędkości kątowej. Układ dwumasowy może również charakteryzować się tendencją do drgań skrętnych, skutkujących różną prędkością kątową silnika i obciążenia w warunkach przejściowych. Złożony charakter obiektu i występujących w nim zjawisk, również o charakterze nieliniowym, powoduje, że zapewnienie wysokiej jakości regulacji minimalizującej wibracje i gwarantującej możliwie wysoką dynamikę momentu i prędkości kątowej wymaga zastosowania zaawansowanych algorytmów sterowania o rozbudowanej strukturze i nietrywialnej procedurze doboru parametrów. W strukturze regulacji często

wykorzystuje się dodatkowe sprzężenia zwrotne od estymowanych za pomocą obserwatora lub filtra Kalmana zmiennych stanu.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono zagadnienie badawcze dotyczące zaawansowanej struktury regulacji prędkości obrotowej z wykorzystaniem koncepcji aktywnej kompensacji zakłóceń dla nieliniowego układu o złożonej strukturze mechanicznej. Opracowano również autorskie procedury doboru parametrów regulatorów i obserwatorów. Zaproponowane rozwiązania zapewniają poprawę właściwości dynamicznych oraz redukcję tętnień prędkości kątowej w stanach przejściowych w porównaniu z rozwiązaniem referencyjnym bazującym na regulatorze PID o dwóch stopniach swobody.

W mojej ocenie tematyka poruszona w rozprawie doktorskiej jest ważna i aktualna zarówno z badawczego jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Tematyka ta zawiera się w obszarze badań w zakresie automatyki i robotyki, które obecnie wchodzi w zakres dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

3. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Bartłomieja Wichra liczy łącznie 158 stron i składa się z 6 rozdziałów obejmujących: wstęp z celem, tezą i zakresem rozprawy oraz obecnym stanem wiedzy, część badawczą, wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych, podsumowanie i wnioski oraz literaturę. Spis literatury zamieszczony na końcu pracy zawiera łącznie 63 pozycje, w tym 3 prace autorskie Doktoranta pochodzące z konferencji międzynarodowych zorganizowanych pod patronatem IEEE. Analiza źródeł literaturowych została przeprowadzona w sposób właściwy.

W rozdziale pierwszym, będącym wprowadzeniem do rozprawy, autor przedstawił przegląd struktur sterowania obiektem o charakterze oscylacyjnym, obiektami z luzem mechanicznym w strukturze, omówił metodę aktywnej kompensacji zakłóceń (*ang.* active disturbance rejection control - ADRC) oraz zamieścił cel i tezę pracy. Celem prac badawczych było opracowanie układu sterowania prędkością w oparciu o metodę aktywnej kompensacji zakłóceń, dla nieliniowego obiektu charakteryzującego się połączeniem o ograniczonej sztywności oraz występowaniem luzu mechanicznego i tarcia. Problem naukowy został jasno sformułowany przez Doktoranta w postaci następującej tezy naukowej:

„Możliwe jest wykorzystanie metody aktywnej kompensacji zakłóceń dla sterowania prędkością złożonego układu mechatronicznego, zawierającego w swojej strukturze połączenia o ograniczonej sztywności, luz mechaniczny oraz tarcie, pozwalającej na uzyskanie zadanych właściwości dynamicznych zamkniętego układu regulacji.”.

W rozdziale drugim Doktorant przedstawił opis matematyczny obiektu sterowania oraz układu regulacji. Zadanie to zostało zrealizowane w dwóch wariantach. Model uproszczony został

przygotowany na potrzeby syntezy układu regulacji, natomiast bardziej szczegółowy powstał w celu wiernego odwzorowania stanowiska laboratoryjnego w środowisku symulacyjnym. W rozdziale tym omówiono również modele najważniejszych komponentów i zjawisk występujących w układach dwumasowych.

W kolejnych rozdziałach zawarto najbardziej wartościowe treści ocenianej rozprawy doktorskiej. Syntezę dwóch układów sterowania prędkością w układzie dwumasowym: ze sprzężeniem zwrotnym od strony silnika oraz ze sprzężeniem zwrotnym od strony silnika i obciążenia przedstawiono w rozdziale trzecim. Dla obu rozpatrywanych układów regulacji kolejno omówiono syntezę zastosowanych obserwatorów zmiennych stanu, bloki odsprzęgania zakłócenia oraz strukturę regulatorów wraz z autorskimi metodami doboru parametrów. Doktorant dokonał również oceny właściwości statycznych i dynamicznych opracowanych układów regulacji na wymuszenie oraz obciążenie a także przeanalizował ich odporność na zmiany wybranych parametrów.

W rozdziale czwartym przedstawiono założenia przyjęte podczas implementacji modeli w środowisku Matlab/Simulink oraz zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych opracowanych struktur regulacji. Kandydat przeprowadził wszechstronne badania właściwości obserwatora o rozszerzonej przestrzeni stanu pracującego w strukturze ADRC1 oraz uogólnionego obserwatora o rozszerzonej przestrzeni stanu zaimplementowanego w strukturze ADRC2. Rozdział zawiera także wyniki badań symulacyjnych zaproponowanych struktur regulacji dla skokowych zmian prędkości zadanej oraz momentu obciążenia dla kilku wariantów parametrów modelu (zmiana momentu bezwładności, wprowadzenie luzu). Zamieszczone w rozdziale wyniki badań symulacyjnych ukazują znaczącą poprawę właściwości dynamicznych, tj. krótsze czasy narastania, brak przeregulowania oraz ograniczone oscylacje prędkości, w porównaniu do rozwiązania referencyjnego z regulatorem PI o dwóch stopniach swobody.

Wyniki badań symulacyjnych zaprezentowane w rozdziale czwartym zostały zweryfikowane na stanowisku eksperymentalnym. Rozdział piąty zawiera informacje dotyczące stanowiska laboratoryjnego oraz implementacji opracowanych algorytmów sterowania w procesorze sygnałowym firmy Analog Devices - ADSP 21369. W rozdziale tym Doktorant przeprowadził eksperymentalną weryfikację zastępczej stałej czasowej pętli regulacji prądu, zweryfikował hipotezę o wpływie szerokości strefy luzu na efektywny współczynnik sprężystości, potwierdził eksperymentalnie poprawność działania opracowanych obserwatorów oraz zweryfikował działanie autorskich algorytmów sterowania dla skokowych zmian prędkości zadanej oraz momentu obciążenia dla obiektu bez luzu i z luzem. Rozdział zawiera również wyniki badań odporności układu regulacji na zmianę momentu bezwładności obciążenia. Warto podkreślić, że wyniki badań eksperymentalnych charakteryzują się bardzo dobrą zbieżnością z badaniami symulacyjnymi i potwierdzają zrealizowanie celu pracy.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych, spostrzeżenia i wnioski, podsumowanie najważniejszych, oryginalnych osiągnięć Autora rozprawy oraz potencjalne kierunki dalszych badań.

4. Ocena rozprawy

W recenzowanej rozprawie doktorskiej przedstawione zostały zagadnienia dotyczące syntezy i analizy struktury regulacji prędkości obrotowej z wykorzystaniem koncepcji aktywnej kompensacji zakłóceń dla nieliniowego układu o złożonej strukturze mechanicznej. Tematyka i przedstawione wyniki są oryginalne i istotne zarówno w skali krajowej jak i światowej. Zaletą rozprawy jest przedstawienie przez Doktoranta pełnego cyklu badawczego, w którym analiza teoretyczna jest uzupełniona wynikami badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych. Założony cel pracy został osiągnięty a teza rozprawy w pełni udowodniona.

Autor przygotowując rozprawę wykazał się znaczną wiedzą teoretyczną i praktyczną, umiejętnością prowadzenia badań naukowych oraz poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych wyników. Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

- opracowanie modelu matematycznego układu napędowego o strukturze dwumasowej, w którym opisano efekty tarcia, luzu oraz właściwości dynamiczne pętli regulacji prądu,
- opracowanie struktury regulacji prędkości wraz z metodą doboru parametrów obserwatora i regulatora dla przypadku, gdy dostępny jest pomiar położenia po stronie silnika napędowego oraz gdy dostępne są pomiary położenia po stronie silnika napędowego i maszyny obciążającej,
- opracowanie i weryfikacja modelu symulacyjnego odpowiadającego układowi laboratoryjnemu, implementacja i badania opracowanych struktur regulacji z obserwatorami dla napędu elektrycznego o zmiennej szerokości luzu i zmiennym momencie bezwładności,
- uruchomienie stanowiska laboratoryjnego z silnikami PMSM, połączeniem sprzężystym i sprzęgłem o nastawianej szerokości luzu, implementacja opracowanych algorytmów regulacji i przeprowadzenie badań.

5. Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

Redakcja pracy jest staranna, tym niemniej autor nie uniknął drobnych błędów edytorskich i stylistycznych, np.:

- W spisie treści nie umieszczono *spisu wybranych oznaczeń i symboli*, który znajduje się na stronie 15 rozprawy.

- Dane bibliometryczne zamieszczone w bibliografii i dotyczące artykułów opublikowanych w czasopismach są niepełne, np. w [6], [12], [21], [22] brakuje nazwy czasopisma i roku wydania, w [1] i [53] znajdują się nadmiarowe informacje "artwork Size".
- Na str. 13 Autor dwukrotnie odwołuje się pozycji [41], na str. 59 pojawia się odwołanie do pozycji [64], która nie występuje w spisie.
- Proszę o wyjaśnienie powodu, dla którego wszystkie schematy blokowe zamieszczone w pracy są opisane w języku angielskim.
- W tabeli 1.3 dwa momenty tarcia (po stronie silnika i po stronie obciążenia) zostały oznaczone tym samym symbolem T_{F1} .
- Omawiając zależność (2.1) Autor nie podał jednostek przy momentach.
- Podczas wyprowadzania zależności opisującej model luzu w podrozdziale 2.2 Doktorant scałkował zależność (2.8) określającą dynamikę zmiany przemieszczenia w strefie luzu, jednak wynikowa formuła (2.9) nadal opisuje pochodną wielkości θ_b .
- W zależności (2.10) przy pierwszym składniku błędnie wpisano indeks dolny, natomiast w równaniach (2.13) i (2.14) występuje błędne oznaczenie T_{F20} .
- Czy w opisach między zależnościami (3.22) i (3.23) oraz formułami (3.25) i (3.26) poprawnie wskazano wartości do jakich dąży zmienna zespolona?
- Czy podpis pod rys. 4.2 oraz odwołanie do niego zamieszczone w tekście na str. 72 są poprawne?
- Zamieszczone na str. 82 podsumowanie zawiera informację o zachowaniu *GESO* dla luzu o szerokości 20 stopni, podczas gdy maksymalna wielkość luzu na przebiegach ukazanych na rys. 4.7 i rys. 4.8 wynosi 20 stopni. Proszę o wyjaśnienie tej rozbieżności.
- Czy informacja o czasie trwania stanów przejściowych zamieszczona na str. 84 jest poprawna?
- Czy odwołania do rys. 4.11 na str. 84 oraz do rys. 4.23 na str. 95 są właściwe?
- W ostatnim zdaniu na str. 107 zamieszczono niepoprawne odnośniki do rysunków. Proszę o skorygowanie usterki.

Po przeanalizowaniu rozprawy nasuwa się kilka uwag o charakterze dyskusyjnym o różnej wadze merytorycznej, na które proszę Doktoranta o odpowiedź:

1. W podrozdziale 1.2.1 ukazującym obecny stan wiedzy Autor omawia główne nurty w zakresie sterowania obiektem o charakterze oscylacyjnym. Punkt dotyczący zastosowania metod sztucznej inteligencji do adaptacji parametrów układów regulacji przy zmieniających się parametrach obiektu został omówiony pobieżnie. Proszę Doktoranta o rozwinięcie tego zagadnienia.

Tolui

2. W podrozdziale 1.2.2 ukazującym sterowanie obiektami z luzem mechanicznym w strukturze Doktorant wskazuje publikacje dotyczące omawianej tematyki jednak nie podaje przykładowych aplikacji. Proszę Autora o wskazanie i omówienie przykładowych aplikacji.
3. W podrozdziale 2.5 dotyczącym modelu nieliniowego Doktorant wyprowadza dwie zależności na efektywny współczynnik sprężystości: (2.17) oraz (2.19). Proszę o graficzne porównanie tych zależności, ze szczególnym uwzględnieniem otoczenia α .
4. W podrozdziale 3.1.4 omawiany jest blok kształtowania sygnału, którego zadaniem jest utrzymywanie wybranych sygnałów w dopuszczalnych zakresach. W ocenianej rozprawie, ze względu na przyjętą strukturę sterowania, omawiany blok nie został zastosowany. Proszę wskazać i omówić inne metody umożliwiające wprowadzenie ograniczeń do układu regulacji oraz o wyjaśnienie jak Doktorant zagwarantował utrzymywanie wartości sygnałów w dopuszczalnych zakresach.
5. Omawiając charakterystyki Bodego ukazane na rys. 3.3 oraz rys. 3.4 Autor wskazuje na dobrą zgodność charakterystyk dokładnych i przybliżonych do poziomu 0,25 częstotliwości granicznej pętli regulacji momentu. Charakterystyka uzyskana dla odtwarzania momentu T_{D1} (rys. 3.3) potwierdza to sformułowanie, natomiast na charakterystyce przedstawionej na rys. 3.4 widać znaczne odstępstwa między analizowanymi wariantami dla podanego poziomu częstotliwości granicznej pętli regulacji momentu. Proszę o komentarz.
6. Proszę o wyjaśnienie jak uzyskano zależności (3.43) oraz (3.57) opisujące uogólnione zakłócenie Z_2 .
7. W podrozdziale 3.2.6 Doktorant omawia właściwości dynamiczne pętli regulacji prędkości oraz przedstawia procedurę doboru wzmocnień regulatora. Do opracowanego algorytmu wprowadzono dodatkowy warunek zapewniający minimalny współczynnik tłumienia dla biegunów zespolonych ξ_{pMIN} , którego wartość arbitralnie ustalono na 0,5. Proszę o wyjaśnienie dlaczego zdecydowano się na taką wartość współczynnika oraz o wyznaczenie nastaw regulatora i zaprezentowanie wybranych wyników badań symulacyjnych dla dwóch innych wartości współczynnika.
8. W tym samym podrozdziale, w punkcie 6 autorskiej procedury doboru wzmocnień regulatora Doktorant zaproponował aby wybierać zestaw wzmocnień dla którego k_p jest największe. Proszę o uzasadnienie tego wyboru.
9. Podczas badania odporności zamkniętego układu regulacji na zmiany wybranych parametrów rozważono 3 warianty. Proszę o zbadanie wpływu zwiększania się szerokości strefy luzu α w przedziale od 0 do 10 stopni dla $R = 5,1$.
10. We wprowadzeniu do badań symulacyjnych Autor wymienia działania umożliwiające wierne odzwierciedlenie struktury stanowiska laboratoryjnego w pakiecie Matlab/Simulink. W ostatnim podpunkcie zamieszczono informację o *ogólnej strukturze programu DSP*. Proszę przedstawić więcej informacji na ten temat.

11. W zamieszczonym na str. 114 podsumowaniu badań symulacyjnych w punkcie 3 Doktorant wskazuje na występowanie błędów systematycznych przy odtwarzaniu momentów w stanie ustalonym w przypadku pojawienia się luzu. Proszę o zaproponowanie rozwiązania, które może ograniczyć błędy.
12. W podrozdziale 5.2 omówiono eksperymentalną identyfikację zastępczej stałej czasowej regulatora prądu. Czy badania wykonano dla zablokowanego wału silnika?
13. Analizując przebiegi eksperymentalne ukazane na rys. 5.18 Autor wymienił 3 spostrzeżenia. Pierwsze z nich dotyczy mniejszego uchybu dynamicznego uzyskanego dla regulatora ADRC1 w porównaniu z regulatorem ADRC2. Wyniki badań symulacyjnych ukazały odwrotną relację uchybu. Co może być przyczyną tej sytuacji?

6. Podsumowanie

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę rozprawy mgra inż. Bartłomieja Wichra z Instytutu Robotyki i Inteligencji Maszynowej Politechniki Poznańskiej. Recenzowana rozprawa doktorska pt. „*Sterowanie nieliniowych układów mechanicznych z wykorzystaniem metody aktywnej kompensacji zakłóceń (ADRC)*” zawiera rozwiązanie problemu naukowego, świadczy o bardzo dobrej wiedzy autora w dyscyplinie automatyka i robotyka, która obecnie zawiera się w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Przedstawione w rozprawie zagadnienia obejmują najnowsze osiągnięcia nauki i świadczą o bardzo dobrej znajomości tematyki prezentowanej przez Autora. Zaproponowane struktury sterowania ADRC i procedury ich projektowania dla układu nieliniowego o złożonej strukturze mechanicznej mogą być podstawą dalszych prac zmierzających do implementacji przemysłowych.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Bartłomieja Wichra z Instytutu Robotyki i Inteligencji Maszynowej Politechniki Poznańskiej, pod tytułem „*Sterowanie nieliniowych układów mechanicznych z wykorzystaniem metody aktywnej kompensacji zakłóceń (ADRC)*” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, wymienione w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2016 r. poz. 882 i 1311) z późniejszymi zmianami.

W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie pracy doktorskiej mgra inż. Bartłomieja Wichra do publicznej obrony.

Tomasz Tawewski