



PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

Szeląg
prof. dr hab. inż. Wojciech Szeląg

dr hab. inż. Paweł Dworak, prof. ZUT
Katedra Automatyki i Robotyki
Wydział Elektryczny
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Szczecin, dnia 19 września 2023 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
NA ZLECENIE PRZEWODNICZĄCEGO RADY DISCYPLINY
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE
POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ

Tytuł rozprawy: **The problem of the modeling uncertainties in the paradigm of the Active Disturbance Rejection Control**

Autor rozprawy: **mgr inż. Radosław Patelski**

I. Cel, zakres i charakter rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy analizy i syntezy algorytmów sterowania wykorzystujących zasadę aktywnej kompensacji zakłóceń (z ang. Active Disturbance Rejection Control, ADRC) obiektami dynamicznymi o jednym wejściu i jednym wyjściu. Autor rozprawy włączył się w nurt badań prowadzonych przez grupy badawcze z kraju i zagranicy i postanowił z jednej strony dokonać gruntownej analizy warunków stabilności takich układów przy założeniu niepewności parametrycznych (modelowania) i w obecności nieznanymi zakłóceń, z drugiej zaproponował metody syntezy układów sterowania wykorzystujących mechanizmy ADRC i adaptacji przy estymacji parametrów obiektu sterowania i/lub nieznanymi zakłóceń. Do realizacji tych zadań wykorzystał zaawansowane i nowe techniki obserwatora stanu rozszerzonego z identyfikacją parametryczną (ang. Parameter Identifying Extended State Observer, PIESO) oraz sterowania z kompensacją zaburzeń z identyfikacją parametryczną (ang. Parameter Identifying Disturbance Rejection Control, PIDRC).

Autor nie sformułował tezy rozprawy, a jej przewodni cel określony jest ogólnie w temacie jako analiza problemów niepewności modelowania obiektu dynamicznego w układach sterowania bazujących na metodzie ADRC. Ten główny cel został w rozprawie zrealizowany poprzez analizę problemów bardziej szczegółowych, w tym przede wszystkim wpływu niepewności modelowania parametrów obiektu – tu wyróżniono mocno niepewność wzmocnienia wejściowego modelu obiektu – estymacji nieznanymi wartości parametrów modelu



i wykorzystującej tą estymatę adaptacyjnej korekty układu sterowania. Uważam, że tak wyznaczone cele rozprawy są zadaniem ambitnym od strony teoretycznej, ciekawym od strony poznawczej i potrzebnym ze względów praktycznych. Są istotne i aktualne na tle obecnego stanu wiedzy, stanowiąc oryginalne zadanie badawcze.

Wyniki analiz ilustrowane są licznymi przykładami symulacyjnymi i eksperymentalnymi przedstawiającymi powyższe problemy w sterowaniu obiektami robotycznymi, manipulatorami i robotami mobilnymi, co pozwala bezpośrednio wykorzystać jej rezultaty na tym polu. Mają też w mojej ocenie potencjalnie bardzo duże zastosowanie praktyczne, umożliwiając bowiem konstrukcję efektywnych algorytmów sterowania różnego rodzaju obiektami dynamicznymi (w tym robotycznymi) w warunkach niepewności ich modelowania i braku możliwości przewidzenia i pomiaru oddziaływujących na obiekt zakłóceń.

Praca wpisuje się idealnie w dotychczasowe osiągnięcia w tym zakresie i stanowi ważne uzupełnienie znanych już rozwiązań. Jej realizacja jest trudna zarówno od strony teoretycznej jak i praktycznej. Wymaga znajomości i umiejętności zastosowania skomplikowanych algorytmów teorii sterowania, dużej wiedzy z zakresu modelowania układów dynamicznych, analizy, syntezy i implementacji algorytmów automatycznego sterowania.

II. Zawartość merytoryczna rozprawy

Rozprawa jest bardzo obszerna, liczy 252 strony i została podzielona na pięć rozdziałów, załącznik i spis literatury. Praca została napisana w języku angielskim.

Pierwszy rozdział, zatytułowany „Introductiton” stanowi wprowadzenie do zasadniczej części rozprawy. Autor omówił problem niepewności modelowania układów dynamicznych, przedstawił klasyfikację niepewności oraz wagę niepewności i zakłóceń w syntezie układów sterowania w robotyce. Następnie dokonał przeglądu literatury, aktualnego stanu wiedzy i trendów badań na temat modelowania i estymacji niepewności, ich wpływu na efektywność układu sterowania i sposobów syntezy odpowiednich regulatorów. Na tle tego przeglądu w podrozdziałach 1.3 oraz 1.4 przedstawiono zakres pracy i treść poszczególnych rozdziałów oraz podsumowano jej główne osiągnięcia. Rozdział kończy wykaz oznaczeń stosowanych w pracy.

Zasadniczą część pracy stanowią rozdziały drugi, trzeci i czwarty. Rozpoczyna ją przedstawienie historii i rozwoju oraz właściwości znanych rodzajów układów sterowania typu ADRC. Dalej zaprezentowano szczegółową analizę wpływu niepewności parametrycznych modelu obiektu na zbieżność estymacji i stabilność pracy układu. Sformułowano szereg twierdzeń opisujących warunki stabilności układów w pętli zamkniętej z regulatorami typu ADRC dla różnych typów błędów modelowania. Szczególny typ niepewności, niepewność wzmocnienia wejściowego modelu obiektu stanowił przedmiot szczegółowej analizy, której wyniki zostały przedstawione

w rozdziale 2.3. Niepewność tą modelowano najpierw jako statyczną, następnie jako element dynamiczny (inercję pierwszego rzędu). Wykazano, że błąd modelowania stałego wzmocnienia wejściowego może w niektórych przypadkach naruszać teoretyczne granice określone w literaturze, bez utraty stabilności. W szczególności pokazano, że teoretyczne warunki stabilności układów ADRC z niepewnościami narzucane są głównie przez wymóg estymacji stanu, a nie przeciwdziałaniu zakłóceniom. Tym samym wykazano, że jeśli znany jest stan układu, ADRC można z powodzeniem zastosować w układach o stosunkowo dużej niepewności wzmocnienia wejściowego. Jako podsumowanie tych rozważań, w podrozdziale 2.4 zaprezentowano i omówiono wyniki zastosowania sterowania ADRC do niektórych problemów praktycznych. Tu szkoda, że nieznaną dynamikę rozpatrywanego układu nie korespondowała bezpośrednio z wynikami analizy teoretycznej i numerycznej. Badane symulacyjnie i eksperymentalnie obiekty sterowania cechowały się innym, niż rozpatrywany wcześniej typem niepewności. Rozdział 2.4 znajduje więc nie jako ilustrację poprzednich rozważań, lecz ich uzupełnienie, wprowadzające np. rozwiązania obserwatorów typu RESO (ang. Resonant ESO).

Podobnie jak w rozdziale drugim, początek rozdziału trzeciego stanowi rys historyczny, przegląd literatury i teoretyczne wprowadzenie, tu, do problemu sterowania adaptacyjnego. Następnie Autor przedstawił szczegółowo zasady syntezy i analizę zbieżności obserwatorów i stabilności pracy układów adaptacyjnych z wykorzystaniem technik obserwatora stanu rozszerzonego z identyfikacją parametryczną (ang. Parameter Identifying Extended State Observer, PIESO) oraz sterowania z kompensacją zaburzeń z identyfikacją parametryczną (ang. Parameter Identifying Disturbance Rejection Control, PIDRC). Oba, z tych algorytmów funkcjonują w oparciu o strukturę ESO oraz ADRC.

Pokazano jak oszacowanie w trybie on-line błędu modelowania można wykorzystać w metodzie sterowania adaptacyjnego. Poprzez szczegółową analizę wykazano, że przy pewnych założeniach, proponowany sposób sterowania (PIDRC) gwarantuje asymptotyczną zbieżność błędów estymacji, identyfikacji i śledzenia. Weryfikacji wyników teoretycznych dokonano szeregiem symulacji numerycznych, a w rozdziale 3.4 badań eksperymentalnych, w których pokazano rozwiązanie problemu identyfikacji parametrów poduszki i sterowania adaptacyjnego kołowego robota mobilnego. Uzyskane wyniki potwierdziły skuteczność i przydatność opracowanych metod w zastosowaniach praktycznych.

Uzupełnieniem osiągnięć opisanych w rozdziałach drugim i trzecim pracy są rozdział czwarty oraz dodatek. W rozdziale czwartym opisano stanowiska laboratoryjne, budowę i sposoby realizacji układów sterowania poduszki oraz zrobotyzowanego układu pozycjonowania teleskopu. Opisy te nie wnoszą już jednak wiele z punktu widzenia opisywanych w poprzednich rozdziałach algorytmów. Przedstawione tam modele były już wykorzystywane we wcześniejszych częściach pracy, np. wzory (4.1)-(4.4) i ich opis stanowią powtórzenie znajdujących się na stronach 165 i 166 opisu i wzorów (3.139)-(3.143). Podobnie model

i eksperymenty wykonywane na stanowisku zrobotyzowanego układu pozycjonowania teleskopu były wykorzystywane wcześniej w rozdziałach drugim i trzecim.

Dodatek stanowi uzupełnienie żmudnych wyprowadzeń wybranych wyrażeń analizowanych w rozdziałach drugim i trzecim. W A.1 wyprowadza się równanie (2.38). W A.2 przedstawia się wyprowadzenia pochodnych funkcji Lyapunowa wykorzystywanych do analizy stabilności algorytmu PIDRC.

Ostatecznie, w rozdziale piątym, Autor podsumował wyniki pracy oraz przedstawił wnioski wyciągnięte po ich analizie.

Spis literatury jest bardzo obszerny, zawiera 351 pozycji, głównie z ostatnich lat. Są one prawidłowo dobrane i zostały zacytowane w treści pracy. 14 z nich stanowią cytowania własnych prac, współautorskich artykułów naukowych opublikowanych w prestiżowych czasopismach i przedstawionych podczas międzynarodowych konferencji naukowych; w dziewięciu z nich Doktorant jest pierwszym autorem.

Układ pracy generalnie oceniam jako właściwy, choć po lekturze pracy odniosłem wrażenie, że Autorowi nie do końca udało się uniknąć przedstawienia swojej pracy jako cyklu publikacji. Pomimo dużego wysiłku włożonego w ujednoczenie i metodyczne przedstawienie wyników, w lekturze daje się chwilami odczuć brak pełnej ciągłości opisu. Na przykład, bardzo duży nacisk poświęcony w rozdziale drugim na analizę niepewności wzmocnienia wejścia modelu pozostaje praktycznie bez jakiegokolwiek echa w dalszej części pracy, a eksperymenty w rozdziale 2.4 nie korespondują bezpośrednio z prowadzoną wcześniej analizą. Podobnie wyniki symulacji i eksperymentów – realizowane dla różnych obiektów sterowania – nie sprawiają wrażenia kolejnego uzupełniania i dążenia do finalnego potwierdzenia opracowanego w pracy, konkretnego algorytmu. Myślę, że wynika to z wspomnianego faktu braku przyjęcia tezy pracy i przedstawienia tu wielu wyników prac cząstkowych, oczywiście, co podkreślam, cennych wyników.

III. Ogólna ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa bardzo dobrze wpisuje się w wyniki prac innych grup badawczych zajmujących się algorytmami sterowania wykorzystującymi układy typu ESO i ADRC. Autor umiejętnie wykorzystuje znane idee, uzyskując nowe, bardziej zaawansowane układy sterowania. Uwzględniając istniejące niemal zawsze niepewności parametryczne modeli obiektów i zakłócenia czyni prezentowane algorytmy zdatnymi w praktycznych zastosowaniach. Mają one szansę być wykorzystane do sterowania obiektami o nieznannej do końca dynamice, narażone na działanie również nieznanymi, zmiennymi zakłóceniami. Autor przedstawia kolejne elementy opracowywanych algorytmów oraz dowodzi poprawności analizy i wyprowadzonych formuł.

W mojej opinii cele pracy zostały osiągnięte. Ich realizację w recenzowanej rozprawie postrzegam jako przygotowanie i gruntowną analizę algorytmów, które z pewnością mogą zostać użyte do sterowania różnorodnymi obiektami dynamicznymi.

Generalnie do głównych osiągnięć Autora zaliczam:

- sformułowanie i dowody twierdzeń prezentowanych w rozdziałach drugim i trzecim, w szczególności dowodów analitycznych niektórych właściwości analizowanych metod,
- szczegółową analizę stabilności układów sterowania typu ADRC w obecności niepewności modelowania, co pozwoliło między innymi na opracowanie wskazań strojenia układów ADRC ze świadomym niedoszacowaniem wzmocnienia wejściowego,
- propozycję adaptacyjnego obserwatora ESO zdolnego do identyfikacji parametrów instalacji przy zapewnieniu zbieżności asymptotycznej układu,
- opracowanie adaptacyjnego kontrolera ADRC gwarantującego asymptotyczne śledzenie.
- implementację i weryfikację analizowanych i opracowanych w pracy algorytmów sterowania w środowisku Matlab/Simulink,
- opracowywanie i wdrażanie narzędzi laboratoryjnych do badań automatyki i eksperymentalną walidację analizowanych układów sterowania ADRC.

Na uwagę zasługuje też duże wyczucie Autora w zakresie problemów praktycznej realizacji analizowanych układów sterowania, umiejętność właściwej interpretacji, wcale nie łatwych, równań i wyciąganie z nich właściwych wniosków, ich znaczenia dla fizycznej pracy układu. Przyjmowane w pracy założenia i właściwości układów odpowiadają rzeczywistym problemom spotykanym w robotyce i praktyce sterowania takimi układami dynamicznymi.

Ponadto praca stanowi praktyczne kompendium wiedzy w zakresie wykorzystania układów ESO i ADRC oraz układów adaptacyjnych do syntezy układów sterowania – są nim szczególnie rozdziały 2., 2.2. oraz 3.1. – i samo to opracowanie stanowi duże osiągnięcie jej Autora. Obszerność i wnikliwość tego opracowania dodatkowo potwierdzają gruntowną wiedzę Autora z zakresu przedmiotu.

Liczba i waga prezentowanych przez Autora wyników skłania mnie do wyrażenia pozytywnej opinii merytorycznej. Oczywiście podczas lektury rozprawy nasunęło mi się jednak kilka pytań i uwag:

1. Już we wprowadzeniu (str. 11) Autor przytacza wnioski z innych prac, że jakość układu sterowania ADRC można poprawić przyjmując „gorszy model”. W rzeczywistości często nie wiemy z całą pewnością jak bardzo się mylimy, jak zatem pogorszyć model, do jakiego stopnia? Jednocześnie jest to wniosek bardzo nieintuicyjny, dlatego wymaga wyjaśnienia, co Autor częściowo czyni, w rozdziale drugim, dla wzmocnienia wejściowego (str. 73). Moją

- ciekawość budzi jednak czy można wprowadzić jakąś miarę tej niepewności – niekoniecznie tylko dla tego parametru – regułę syntezy regulatora?
2. Niestety, ważną cechą opracowywanych układów, a w zasadzie wielu zaawansowanych układów sterowania, jest często duża liczba parametrów niezbędnych do dobrania dla prawidłowej ich pracy. Zazwyczaj autorzy odwołują się do doświadczenia, bez podawania jednoznacznych kryteriów jakości sterowania. Czy możliwe jest opracowanie takich kryteriów dla opisywanych w pracy układów?
 3. W rozdziale 2.3.1 (i dalszych częściach pracy) Autor zakłada częściową, a nawet całkowitą, mierzalność stanu obiektu sterowania, $\eta \in \{0,1,2\}$. W analizie stabilności układu przyjmuje jednak w każdym przypadku obserwator pełnego rzędu. Czy Autor podejmował się analizy układu z obserwatorem o innej strukturze, niepełnego rzędu?
 4. We wszystkich symulacjach i eksperymentach jakość działania układu weryfikowano jedynie poprzez kryterium (2.107). W praktyce o jakości sterowania mogą decydować też inne czynniki, jak np. (maksymalne) amplitudy sygnałów sterowania, co ma związek z ograniczeniami ich wartości. Czy Autor weryfikował takie parametry podczas symulacji? Czy ewentualne nasycenia sygnałów sterowania miały znaczenie podczas eksperymentów?
 5. Czy wszystkie wartości estymat parametrów θ z eksperymentu 3.1 pokazane na rysunku 3.27 (i 3.29) się ustabilizowały? Co do parametru θ_5 mam wątpliwości. Jak zatem oceniano moment „zakończenia” estymacji, a w eksperymentach czy symulacjach momenty ich przzerwania?
 6. Dlaczego w symulacji 3.14 przyjęto inne wzmocnienie adaptacji niż w eksperymencie 3.2? Dlaczego pokazano je z innymi podstawami czasu (długościami symulacji/eksperymentu)? Czy możemy zatem porównywać ten eksperyment z jego symulacją?
 7. W opisie tego samego eksperymentu 3.2 Autor pisze „the state and disturbance estimates are heavily noised due to the character of the experimental setup, but a diminishing of the disturbance estimate with identification progress is observed.” Niestety na rysunku 3.33 tego postępu nie dostrzegam.
 8. Na wykresach 3.37 przedstawiających wyniki eksperymentu 3.3 widać, że estymaty parametrów θ są cyklicznie zaburzane. Co może być tego przyczyną, bo na pewno nie są to zakłócenia stochastyczne?

IV. Uwagi szczegółowe

Rozprawa napisana jest starannie, bardzo poprawnym językiem, jest również zredagowana bardzo dobrze pod względem edycyjnym i wskazywanie nielicznych usterek, przy ogólnie bardzo dobrej ocenie tego jej elementu, wydaje się być niepotrzebne. Jedynym mankamentem, na który chciałbym jednak zwrócić uwagę są opisy rysunków przedstawiających wyniki symulacji i eksperymentów. Są one często bardzo ogólne, nie można bezpośrednio powiązać ich z konkretną symulacją, czy eksperymentem, zdarza się, jak w przypadku rysunków 2.24 – 2.27, że są jednakowe, a przecież przedstawiają wyniki różnych eksperymentów. Utrudnienie stanowi

też konieczność rozróżnienia w legendach wykresów pisanych małymi czcionkami symboli kreski i falki, czy „przezroczystość” przebiegów.

V. Wnioski końcowe

Dyplomant w recenzowanej Rozprawie jednoznacznie dowiódł swoich umiejętności systematycznej analizy problemu technicznego, dużej wiedzy z zakresu teorii sterowania i robotyki, umiejętności analizy, syntezy i weryfikacji wyników opracowywanych układów sterowania. Wykazał wiedzę i umiejętności właściwe dyscyplinie naukowej *Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne* oraz potwierdził predyspozycje do prowadzenia badań naukowych. Przedstawione w pracy algorytmy i wyniki badań symulacyjnych stanowią cenne uzupełnienie osiągnięć innych grup badawczych.

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska mgr inż. Radosława Patelskiego, pt. „The problem of the modeling uncertainties in the paradigm of the Active Disturbance Rejection Control” merytorycznie spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, stawiane rozprawom doktorskim, i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

