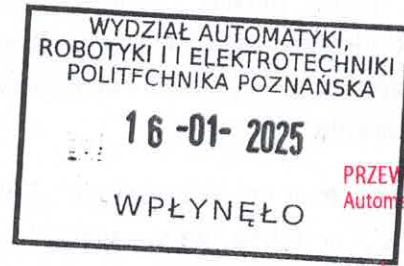


Gliwice. 14.01.2025

Dr hab. inż. Krzysztof Stebel, prof. PŚ
Politechnika Śląska
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki
Katedra Automatyki i Robotyki
Ul. Akademicka 16, pok. 229, 44-100 Gliwice
Email: krzysztof.stebel@polsl.pl



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

Recenzja

Rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Jacka Michalskiego
pt.: „ Analiza wpływu struktury modelu i metod strojenia obserwatora w kontekście
poprawy działania technik ADRC w środowiskach deterministycznych
i stochastycznych”

Uwagi wstępne

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Stefan Brock, prof. PP.
Przewód doktorski jest prowadzony przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektrotechnika i Technologia Kosmiczne Politechniki Poznańskiej.
Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektrotechnika i Technologia Kosmiczne Politechniki Poznańskiej Prof. Dr hab. inż. Wojciecha Szelaąg pismem (DR-012/130/2024) z dnia 27.11.2024.
Praca recenzowana jest zgodnie z zapisami art. 186 oraz 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późniejszymi zmianami).

Opinia o tematyce i zakresie rozprawy

Obecnie metoda regulacji z aktywną kompensacją zakłóceń ADRC (Active Disturbance Rejection Control) jest bardzo popularna w środowisku naukowym, ale ma również potencjał na zaistnienie w środowisku przemysłowym. W swojej podstawowej formie zakłada rozszerzony obserwator stanu ESO (Extended State Observer) oraz algorytm regulacji na nim bazujący. Otwiera to całą gamę możliwości badawczych kładąc akcent na różnych aspektach tego algorytmu.

Z jednej strony prowadzi się badania nad modelami służącymi do opisu procesu. Na początku zakłada się najprostszy przypadek, kiedy zakłada się tylko rząd obiektu i na tej podstawie buduje model w postaci wielokrotnego integratora. To podejście jest atrakcyjne ze względu na prostotę i podobieństwa do tradycyjnych regulatorów jak PID dla niskich rzędów obiektu. Można jednak stwierdzić, że nie należy „zamykać oczu” na to, co wiadomo, a w wielu przypadkach fragmenty modelu są znane i dobrze sparametryzowane. Fragmenty modelu, które niosą istotną informację warto, zatem integrować z algorytmem regulacji, aby nie odkrywać drogą estymacji to, co oczywiste.

Z drugiej strony prowadzi się badania nad różnymi estymatorami stanu. W przypadkach najprostszych istnieją dopracowane, wręcz intuicyjne zasady strojenia estymatorów. Jednak, gdy do estymatora wprowadza się elementy modelu liniowego czy nieliniowego sytuacja

ulega komplikacji. W pewnych sytuacjach możliwe jest zastosowanie szczegółowych zasad opracowanych przez innych badaczy. Istnieje jednak szereg przypadków, w których konieczna jest głęboka analiza i poszukiwanie parametrów spełniających indywidualnie zdefiniowane optimum. Problem nabiera szczególnego znaczenia, gdy w układzie pojawiają się istotne zakłócenia.

W tym kontekście teza pracy brzmiąca: „**Uwzględnienie znanej części modelu w procesie syntezy ADRC, a także wykorzystanie technik adaptacji parametrów i strojenia estymatorów stanu, mogą poprawić precyzję i jakość regulacji dla obiektów sterowania ruchem.**” Może być uznana, jako trafna i istotna z punktu widzenia zarówno naukowego jak i przemysłowego.

Aspekty tezy głównej zostały doprecyzowane przez tezy pomocnicze:

Teza pomocnicza 1: „W przypadku występowania niedominującej stabilnej dynamiki obiektu synteza algorytmu regulacji może zostać przeprowadzona na podstawie uproszczonego modelu niższego rzędu.”

Teza pomocnicza 2: „Uwzględnienie zidentyfikowanych parametrów modelu w algorytmie ADRC może prowadzić do poprawy, jakości regulacji względem podejścia bezmodelowego.”

Teza pomocnicza 3: „Zastosowanie technik adaptacji parametrów pozwala uzyskać dobrą, jakość regulacji i odrzucania zakłóceń względem podejść nieadaptacyjnych w przypadku występujących błędów modelowania, a także w przypadku zmiennych w czasie wartości parametrów.”

Teza pomocnicza 4: „Badania nad strojeniem obserwatorów stanu prowadzą do poprawy informacji sensorycznej i jakości regulacji w warunkach zakłóceń stochastycznych.”

Tezy pomocnicza 1 została w głównej mierze potwierdzona w rozdziale 3 pracy. Pozostałe 3 tezy pomocnicze zostały zaadresowane w rozdziałach 3 i 4 z czego teza 4 została głównie potwierdzona w rozdziale 4.

Przegląd i ocena treści rozprawy

Przedstawiona rozprawa, o objętości 180 stron, zawiera 5 zasadniczych rozdziałów oraz bibliografię obejmującą 143 pozycji odnoszących się do stanu wiedzy w zakresie tematycznym rozprawy.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawia rys historyczny i przegląd literatury prezentujący aktualny stan wiedzy w zakresie algorytmu ADRC. Słusznie zaznaczono, że występują pewne podobieństwa pomiędzy algorytmami ADRC i PID w zakresie możliwości empirycznego strojenia i bazowania na uchybie regulacji. Podobieństwa te są szczególnie widoczne dla modeli do drugiego rzędu. Taka sytuacja przełamuje opory wewnętrzne wielu inżynierów praktyków i sprzyja znaczącej popularyzacji tego algorytmu w zastosowaniach przemysłowych. Pozwala na wprowadzenie metod strojenia ADRC bazujących na nastawach PID. Doktorant w pewnych przypadkach wykazał przewagę algorytmu ADRC nad PID wynikającą z posiadanego modelu, który niesie istotne informacje o obiekcie lub lepiej

dobranej struktury regulacji. W przeglądzie literaturowym zwrócono uwagę również na ważną modyfikację algorytmu określaną, jako eADRC pokazując w pewnym oczywiście zakresie możliwość zamiennego stosowania wejścia pomiarowego i uchybu regulacji, jako podstawy regulacji. W tej wersji szczególnie wyraźnie jego struktura wykazuje analogie do regulatora PID. Nie bez znaczenia jest sposób transformacji algorytmu z postaci ciągłej do dyskretnej niezbędnej dla celów implementacyjnych. Przegląd pokazuje, że uproszczenia modelu zarówno w zakresie rzędu modelu jak i innych elementów mają swoje konsekwencje w postaci zmieniającej się, jakości regulacji. Doktorant w sposób logiczny prowadzi do uogólnionej postaci algorytmu (GADRC) dedykowanego najczęściej do trudnych obiektów i zestawienia z innymi algorytmami jak IMC czy H_∞ . W przypadku procesów niestacjonarnych wskazane są różne metody adaptacji pod tym względem również literatura została przeanalizowana. Kolejną kwestią zauważoną w literaturze jest możliwość występowania niepomiernalnych szumów pomiarowych stąd różne propozycje metod obserwacji stanu i filtracji wstępnej. Doktorant sformułował tezę główną stwierdzającą, że uwzględnienie znanej części modelu w procesie syntezy ADRC uzupełnionego o techniki adaptacyjne poprawi precyzję i jakość regulacji dla obiektów sterowania ruchem. Postawiona teza brzmi logicznie pod warunkiem, że cały proces syntezy wszystkich elementów algorytmu zostanie przeprowadzony zostanie przeprowadzone prawidłowo i z należytą starannością.

W rozdziale drugim Doktorant przedstawia zasadę działania algorytmu regulacji z aktywną kompensacją zakłóceń. Opis rozpoczyna się od wersji podstawowej określanej, jako bezmodelowa. Jest on wzbogacony przykładami, które trafnie ilustrują jego możliwe zastosowanie. Szczegółowo opisana jest również metodologia tworzenia rozszerzonego obserwatora stanu. Pobieźnie opisane zostało projektowanie regulacji dla układów o wielu wejściach i wyjściach. Następnie Autor przeszedł do opisu uogólnionego ADRC prezentując zakładaną strukturę modelu. W związku z odpowiednią konwencją zapisu i nazewnictwa ogólna postać mfADRC jest podobna do postaci bezmodelowej, dzięki temu widoczne są dalsze analogie w budowie rozszerzonego obserwatora stanu i prawie sterowania. W zakresie doboru nastaw praca skupia się na klasycznej metodzie, jaką jest lokowanie biegunów, inne metody są tylko wzmiankowane. Rozdział kończy się przykładową syntezą układu regulacji dla konkretnego nieliniowego obiektu II rzędu. Przykład został tak dobrany, aby występowały wszystkie elementy w modelu. Dla wybranego modelu badano wpływ parametrów obiektu, na jakość regulacji przy stałych parametrach projektowych algorytmu. Badano również, jakość w warunkach niepewności parametrycznej, w której potwierdzono ogólny wniosek, że przy zbyt dużej niepewności rezygnacja ze sterowania opartego o model może być słuszną.

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawił zbiór modyfikacji wynikających z literatury jak i wkładu własnego. W podrozdziale 3.1 zaprezentowano opis transmitancyjny algorytmu oraz układu zamkniętego SISO i SIMO. Poruszono istotną kwestię możliwości redukcji rzędu w przypadku występowania niedominującej dynamiki w obiekcie regulacji. Zawarto reprezentatywne przykłady ilustrujące.

W podrozdziale 3.2 zaprezentowano możliwości sterowania adaptacyjnego z identyfikacją parametrów metodą RLS. Z pomocą przykładów zilustrowano cechy takiego podejścia.

W podrozdziale 3.3 zaprezentowano zastosowanie dyskretnego filtru Kalmana, jako alternatywną estymację stanu. Zamieszczone przykłady wskazują na pewne zalety DF KF względem ESO w warunkach dużego zaszumienia sygnału pomiarowego.

W podrozdziale 3.4 omawia kolejną alternatywę dla estymacji stanu w postaci dyskretnego filtra cząsteczkowego (PF). Porównano wyniki działania ESO, KF i PF. Filtr cząsteczkowy wykazuje istotną przewagę tylko wtedy dla multimodalnych rozkładów gęstości prawdopodobieństwa zakłóceń, co jednak wiąże się ze znacznie większą złożonością obliczeniową. W podrozdziale 3.5 przedstawiono metodę strojenia obserwatora ESO na podstawie filtra Kalmana. Wykazano ograniczenia strojenia obserwatora ESO metodą lokowania biegunów i zalety strojenia na podstawie stanu ustalonego filtra Kalmana. Przykłady symulacyjne skupiają się na warunkach, kiedy różnica w podejściach do strojenia obserwatora staje się istotna.

W rozdziale 4 Doktorant przedstawił w większości wyniki eksperymentów dla obiektów rzeczywistych. Zaprezentował przyjęte modele i wynikające z nich algorytmy regulacji. W podrozdziale 4.1 zaprezentowano silnik prądu stałego i jego model oraz sposoby jego sterowania. Analizowano mfADRC jak i mbADRC wykazując w określonych sytuacjach różnice. Podrozdział 4.2 opisuje obiekt regulacji związany z stołem balansującym kulką. Model prezentuje zachowanie stołu bez uwzględnienia dynamiki układu wykonawczego w postaci serwomechanizmów. Zaprezentowano różne wersje algorytmu ADRC i estymacji stanu. Podrozdział 4.3 prezentuje zagadnienia związane z wahadłem reakcyjnym. W zależności od położenia środka masy układ może być stabilny bądź niestabilny, co daje dodatkowe możliwości testowania. Z punktu widzenia modelu układ jest bardzo ciekawy ze względu na możliwość stosowania dwóch sygnałów wyjściowych z różnymi wagami w prawie sterowania. Duża wrażliwość układów regulacji na niepewności parametryczną ograniczyła ilość proponowanych podejść do uogólnionego ADRC. Rozważania teoretyczne zostały zilustrowane testami eksperymentalnymi w sposób prawidłowy.

Osiągnięcia rozprawy

Na podstawie analizy treści rozprawy można potwierdzić osiągnięcia, które Autor wymienia w swoim podsumowaniu. Jako osiągnięcie w mojej ocenie należy uznać:

- (O1) Przygotowanie wnikliwej i obszernej analizy stanu obecnego i perspektyw dla algorytmu ADRC, która może być przydatna z punktu widzenia przemysłu 4.0.
- (O2) Zastosowanie analizy transmitancyjnej w zakresie układu zamkniętego i doboru nastaw. Sama analiza transmitancyjna jest podejściem klasycznym, ale szczególnie w kontekście doboru nastaw może być uznana za nowe podejście.
- (O3) Propozycje w zakresie syntezy algorytmu mające na celu włączenie dodatkowych informacji z modelu.
- (O4) Powiązanie, jakości sterowania algorytmu ADRC z zastosowanym algorytmem estymacji stanu dla określonych przykładów.
- (O5) Opracowanie metody strojenia ESO w warunkach znaczącego szumu pomiarowego.
- (O6) Propozycja metody sterowania dla obiektu niedosterowanego.
- (O7) Weryfikacja eksperymentalna niektórych podejść teoretycznych rozpatrywanych w literaturze.

Uwagi dyskusyjne, komentarze i uwagi edytorskie

Podczas lektury recenzowanej rozprawy nasunęły się pewne uwagi o charakterze dyskusyjnym. Są one podane poniżej:

Uwagi ogólne:

(UO1) W pracy dość szeroko dyskutowano występowanie niedominującej stabilnej dynamiki obiektu. Wiadomo, że w miarę jak rośnie agresywność sterowania pojęcie niedominującej dynamiki może ulec zmianie. W moim odczuciu zabrakło dyskusji w tym zakresie.

Uwagi szczegółowe

(US1) W rozdziale 2 rysunki 2.5 i 2.6, nieco zbyt pobieżnie opisane. Trudno dokładnie stwierdzić, w jakim zakresie opis odnosi się do jednego lub drugiego wykresu.

(US2) Na rysunku 2.7 (str. 45) pokazano wartość $u(0)=5$ oraz $y(0)=0$. Dla stanu ustalonego obowiązuje model $y=-u/2$, co zgadza się z pozostałą częścią wykresu. Jeśli stan początkowy $y(0)$ nie jest stanem ustalonym, to jak został zainicjowany stan obserwatora? O czym świadczy wahnięcie wartości sterującej $u(t)$ w przeciwnym kierunku dla mbADRC? Dla wskazanego przykładu porównano mfADRC z mbADRC. Dlaczego nie dokonano porównania z konwencjonalnym PID dla równoważnego strojenia, pokazując w ten sposób związki pomiędzy nastawami PID a parametrami ADRC?

(US3) Użyto sformułowania (tym samym do wzmoceń ESO i sterownika) str. 45. Słowo „Sterownika” nie pasuje do kontekstu prawdopodobnie przez tłumaczenie z języka angielskiego, zasadne byłoby użycie słowa „regulatora”.

(US4) Dla przykładu 2.5 (str. 46-47) model stanu ustalonego ma postać:

$y^3-200*\sin(y)+40u=0$ wartość $y=3$ nie jest prawidłowa dla $u=0$.

(US5) W przykładach 3.4 i 3.5 dokonano porównania układów, ale ograniczono się wyłącznie do porównania wizualnego. Ze względu na bardzo zbliżone wyniki powinny być porównane za pomocą wybranych wskaźników.

(US6) Błąd językowy, str. 82, w akapicie pod tabelą 3.5. „Widoczny jest po wynikach symulacji”.

(US7) W rozdziale 4.1 zaprezentowano stanowisko z silnikiem prądu stałego jednak jego opis uważam za niewystarczający:

Brakuje opisu, w jaki sposób generowany jest sygnał sterujący.

Brakuje opisu, w jaki sposób dodawane jest sztucznie zakłócenie do układu rzeczywistego. Z wykresów wynika, że układ w wersji bazowej można traktować, jako układ pozbawiony jakichkolwiek zakłóceń rys 4.3, 4.4. Czy wprowadzone zakłócenie/szum ma jakieś uzasadnienie i reprezentuje rzeczywiste problemy, czy miało to na celu wyłącznie zaprezentować właściwości algorytmu?

(US8) W rozdziale 4.2 wprowadzono zakłócenia, jednak nie przedyskutowano ich adekwatności. Zakłócenie wprowadzono wymuszając sztucznie przesunięcie siłownika, czyli wchodziło przez taką samą dynamikę. Jakie byłoby zachowanie gdyby pozycja kulki była zakłócana w inny sposób? W jakich sytuacjach powstaje tak duży szum pomiarowy, czy jego charakter jest reprezentatywny np. ze względu na rozkład?

(US9) W tabeli 4.11 błędna jednostka stałej momentowej silnika i elektrycznej. Powinno być $kt[Nm/V]$ oraz $ke[Vs/rad]$.

Wniosek końcowy

Na podstawie przeglądu treści rozprawy stwierdzam, że jej Autor posiada aktualnie głęboką wiedzę teoretyczną praktyczną w zakresie algorytmu ADRC jak i różnych obserwatorów stanu. Do weryfikacji proponowanych rozwiązań zastosowano układy mechaniczne mogące być klasyfikowane, jako łatwe (silnik) i trudne (wahadło reakcyjne). Prawidłowo zostały

dobrane narzędzia w zależności od poziomu trudności rozwiązywanych problemów. Obiekt nieliniowy silnie zakłócony wymaga znacznie bardziej wyrafinowanego rozwiązania niż prosty model liniowy.

Rozprawa prezentuje oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego analizy wpływu struktury modelu i metod strojenia obserwatora w kontekście poprawy działania technik ADRC. Nie bez znaczenia jest również znaczący dorobek literaturowy Autora w postaci 23 pozycji, z których niektóre są na liście wysoko punktowanych czasopism.

Jednocześnie stwierdzam, że zamieszczone uwagi dyskusyjne nie umniejszają wartości ocenianej rozprawy.

Podsumowując, stwierdzam, że przedłożona do zaopiniowania rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Jacka Michalskiego spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określonym w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późniejszymi zmianami). Wnioskuje zatem do Wysockiej Komisji powołanej przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autora, mgr. inż. Jacka Michalskiego do publicznej obrony.

