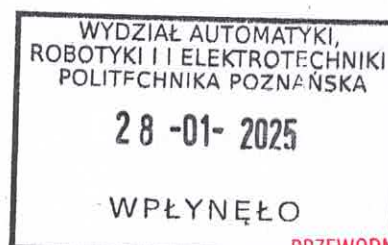


Łódź, 08.01.2025 r.

Dr hab. inż. Jacek Kabziński, prof. PŁ
Instytut Automatyki Politechniki Łódzkiej
ul. Stefanowskiego 18
90-537 Łódź



PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

RECENZJA

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

opracowana na zlecenie

Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Politechniki Poznańskiej

1. Podstawa recenzji i otrzymane materiały

Opinię przygotowałem jako recenzent wyznaczony uchwałą nr 13/2024-2028 Rady Dyscypliny AEEiTK Politechniki Poznańskiej. Podstawą przygotowanej recenzji jest praca doktorska w formie papierowej i w postaci zgodnego pliku pdf. Korzystałem też z profilu ORCID Autora. Otrzymałem informację, że postępowanie o nadanie stopnia naukowego doktora mgr. inż. Jacka Michalskiego, asystenta w Instytucie Robotyki i Inteligencji Maszynowej PP (wszczęte 06.11.2024 r. w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie naukowej: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne) procedowane jest wg:

- Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r., poz. 1571),
- Uchwały Nr 143/2020-2024 Senatu Akademickiego Politechniki Poznańskiej z dnia 5 lipca 2023 r.,
- Uchwały nr 42/2023-2024 Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej.

2. Tematyka rozprawy, jej cele i tezy

Recenzowana rozprawa jest poświęcona znanej i popularnej metodzie sterowania *Active Disturbance Rejection Control*, którą po polsku można nazwać aktywną kompensacją zakłóceń. Główna idea tej techniki projektowania układu regulacji zasadza się na:

- zastosowaniu względnie prostego modelu dynamiki obiektu (np. liniowego, zredukowanego rzędu, w postaci łańcucha integratorów);
- przedstawieniu oddziaływania błędów w modelowaniu i zakłóceń w postaci tak zwanego „zakłócenia totalnego” lub „całkowitego/uogólnionego” (*total/generalized disturbance*), reprezentowanego przez dodatkową (fikcyjną) zmienną stanu,
- zaprojektowaniu obserwatora odtwarzającego tak rozszerzony wektor stanu,
- zaprojektowaniu prawa sterowania wykorzystującego estymaty wszystkich zmiennych stanu, kompensującego zakłócenie totalne oraz narzucającego pożądaną dynamikę układu zamkniętego.

Metoda jest intensywnie rozwijana przez ostatnie 25 lat. Przedstawiono jej bardzo liczne warianty i wiele zastosowań praktycznych, które w dużej części dotyczą układów sterowania ruchem, układów napędu elektrycznego, układów elektro-mechanicznych, robotyki itp. Jest bardzo popularna – np. krótka praca przeglądowa Hana¹ z roku 2008 była cytowana blisko 5 000 razy (przeeglądana 45 000 razy). Badania nad kolejnymi wariantami i zastosowaniami ADRC są bardzo intensywnie kontynuowane. Sama baza IEEE Xplore wykazuje blisko 2500 prac w ostatnich 5 latach, w tym ok. 50 Early Access Articles, czyli prac przyjętych do druku i jeszcze nie opublikowanych w ostatecznej postaci.

To, że Doktorant podjął się uzyskania nowych wyników w tak popularnym i intensywnie eksplorowanym obszarze badawczym wzbudza uznanie i szacunek. Dodatkowo doceniam każdą próbę rozwoju teorii sterowania w czasach gdy większość prac ogranicza się do prezentowania jej zastosowań.

Autor rozprawy twierdzi, że może wskazać pewne modyfikacje metody ADRC, nowe metody doboru parametrów i nowe metody analizy układu zamkniętego, które pozwolą na poprawę jakości regulacji w układach tak projektowanych. Wskazuje na to, że prezentowana praca jest kontynuacją badań prowadzonych wcześniej w Instytucie RiIM przez dra Patelskiego i prof. Pazderskiego (pozycje [97-102]² spisu literatury).

Teza rozprawy jest sformułowana w następujący sposób:

¹ J. Han, "From PID to Active Disturbance Rejection Control," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol2-906, March 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.2011621.

² W nawiasach kwadratowych podano odniesienia do prac ujętych w spisie literatury w rozprawie; odwołania do pozycji nie ujętych w tym spisie podano w przypisach dolnych

49 „Uwzględnienie znanej części modelu w procesie syntezy ADRC, a także wykorzystanie
50 technik adaptacji parametrów i strojenia estymatorów stanu, mogą poprawić precyzję i jakość
51 regulacji dla obiektów sterowania ruchem.”

52 To bardzo ostrożne sformułowanie. Uwzględnienie większego zasobu informacji, adaptacja
53 i strojenie poprawia siłą rzeczy jakość pracy każdego układu regulacji. Wartość pracy polega
54 więc na wskazaniu konkretnych, nowych metod postępowania przy projektowaniu układów
55 regulacji metodą ARDC, które poprawiają jakość regulacji w porównaniu z projektowaniem,
56 w którym tych modyfikacji się nie stosuje. Moim zdaniem Autor kładzie nacisk na takie metody
57 projektowania i strojenia, które minimalizują liczbę parametrów projektowych i mogłoby to
58 być podkreślone w celach rozprawy. Mam też wątpliwości, czemu w tezie ograniczono wyniki
59 do „obektów sterowania ruchem”. Nie wiadomo jak Autor dokładnie definiuje tę klasę (raczej
60 chyba układów regulacji, a nie „obektów”). Mam wrażenie, że Autor chciał w ten sposób
61 wyróżnić klasę zastosowań, z której wybiera przykłady i przeprowadzone eksperymenty, ale
62 wyniki mogą dotyczyć wielu innych obektów sterowania.

63 Teza rozprawy jest uściślona w czterech „tezach pomocniczych”:

- 64 1) *W przypadku występowania niedominującej stabilnej dynamiki obiektu synteza*
65 *algorytmu regulacji może zostać przeprowadzona na podstawie uproszczonego modelu*
66 *niższego rzędu.*
- 67 2) *Uwzględnienie zidentyfikowanych parametrów modelu w algorytmie ADRC może*
68 *prowadzić do poprawy jakości regulacji względem podejścia bezmodelowego.*
- 69 3) *Zastosowanie technik adaptacji parametrów pozwala poprawić jakość regulacji i*
70 *odrzuć zakłóceń względem podejść nieadaptacyjnych w przypadku wystąpienia*
71 *błędów modelowania, a także w przypadku zmiennych w czasie wartości parametrów.*
- 72 4) *Badania nad strojeniem obserwatorów stanu prowadzą do poprawy informacji*
73 *sensorycznej i jakości regulacji w warunkach stochastycznych zakłóceń pomiarowych.*
74

75 które w precyzyjny i prawidłowy sposób określają zamiary i cele autora.

76
77 Nie ma żadnej wątpliwości, że tematyka rozprawy jest aktualna, mieści się doskonale
78 w obszarze dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.
79 Podjęte w rozprawie zagadnienia teoretyczne lokują ją w obszarze teorii sterowania,
80 a zastosowania i przykłady w obszarze elektrotechniki i sterowania układami elektro-
81 mechanicznymi.

83 3. Postać rozprawy i forma przedstawionych wyników

84 Rozprawa doktorska przedstawiona do oceny liczy 180 stron, zawiera polskie i angielskie
85 streszczenie, pięć rozdziałów, literaturę spis tabel i rysunków, oddzielny spis publikacji

autorstwa/współautorstwa doktoranta. Rozprawa jest napisana po polsku. Spis literatury jest bogaty - zawiera 143 pozycje, umieszczone w kolejności alfabetycznej, i w większości są one faktycznie cytowane w tekście rozprawy. Autor uwzględnił tu także prace z roku 2024, w którym edytował rozprawę, co dobrze świadczy o jego staranności i skrupulatności w śledzeniu wyników badań w obszarze, którym się zajmuje.

Profil ORCID autora, zawiera na dzień pisania recenzji 15 pozycji. Znaczna część z nich dotyczy cząstkowych rezultatów prezentowanych w rozprawie, np. ostatnia³. Doktorant jest też współautorem pakietu oprogramowania służącego do projektowania układów regulacji metodą ADRC⁴. Dodatek do rozprawy „Wykaz dorobku naukowego” zawiera z kolei 23 pozycje z lat 2017-2024. Wszystko to pokazuje, że doktorant aktywnie publikował, nie ograniczał się do przygotowania rozprawy, a podjęta tematyka jest dla niego nieprzypadkowa.

Rozprawa przedstawia wyprowadzenia i wyniki teoretyczne, badania symulacyjne i eksperymenty na trzech stanowiskach laboratoryjnych. Zawiera więc elementy składające się na kompletny proces badawczy przyjęty w dyscyplinie.

Praca jest zredagowana poprawnie. Zauważone (nieliczne) błędy, które czasem utrudniają zrozumienie, dotyczą niezręczności gramatycznych i stylistycznych, bądź niejasnej terminologii. Wykresy i rysunki są dobrej jakości, właściwie dobrane i w większości dobrze opisane. Nie zauważyłem istotnych błędów w przedstawionych wyprowadzeniach i wzorach. Uwagi szczegółowe umieściłem w dodatku do recenzji.

4. Charakterystyka rozprawy i ocena uzyskanych wyników

Pierwszy rozdział pracy zawiera rys historyczny prac, które, według Autora, prowadziły do powstania koncepcji ADRC oraz obszerny przegląd literatury, który Autor nazywa „przeglądem aktualnego stanu wiedzy”. Prac dotyczących ARDC powstaje bardzo wiele i trudno powiedzieć, czy jest to faktycznie kompletny przegląd literatury. Autor próbuje systematyzować różne rodzaje algorytmów ARDC zestawiając je w tabeli 1.3. Może bardziej pomocny byłby schemat pokazujący zależności między różnymi koncepcjami (założenia, struktura układu regulacji itp.)? Autor powraca jeszcze do przeglądu literatury w innych częściach pracy, np. w rozdziale 3 na str. 59 i w innych miejscach. W sumie, choć bibliografia

³ Michalski, J.; Mrotek, M.; Pazderski, D.; Kozierski, P.; Retinger, M. Improving Performance of ADRC Control Systems Affected by Measurement Noise Using Kalman Filter-Tuned Extended State Observer. *Electronics* **2024**, *13*, 4916. <https://doi.org/10.3390/electronics13244916>

⁴ Pozycja 12 dodatku „Wykaz dorobku naukowego”

jest obszerna i reprezentatywna dla przedmiotu, rozdział 1.2 sprawia wrażenie dość chaotycznego i nie precyzuje jasno, co stanowi punkt wyjścia rozprawy.

Tym ważniejszy staje się rozdział 2, w którym Autor prezentuje te formy algorytmu, do których będzie odnosił wprowadzane przez siebie modyfikacje. Choć z założenia są w nim przedstawione struktury znane z literatury, to stanowi on niejako bazę i punkt odniesienia dla całej pracy.

W całej pracy, konsekwentnie, są rozważane dwie podstawowe struktury, które Autor nazywa mfADRC (ang. model-free ADRC) i mbADRC (ang. model-based ADRC).

Opis podstawowej struktury układu regulacji mfADRC zamieszczono w rozdziale 2.1. Nie uwzględniono tu filtru wartości zadanej ani bloku zwanego „tracking differentiator” co jest typowe dla wielu innych publikacji dotyczących ADRC. Wyjaśnienie roli tego bloku i konsekwencji jego pominięcia powinno znaleźć się w odpowiedziach na recenzję lub w prezentacji w trakcie obrony. Wyprowadzenie przedstawione w rozdziale 2.1 jest zasadniczo poprawne, choć jego przejrzystość zyskałaby po wprowadzeniu kilku poprawek:

- model obiektu (2.2-3) oraz (2.11) wymaga uporządkowania założeń – np. trzeba założyć różniczkowalność f względem czasu, czyli także różniczkowalne sterowanie $u(t)$;
- warto podkreślić strukturalną obserwowalność pary $(c^T A)$ układu 2.13;
- $\hat{x}$ w równaniu (2.20) powinno być zastąpione przez $\hat{x}_n$ -estymatę wektora x_n wprowadzonego w (2.19);
- może byłoby sensowne łączne napisanie równań dynamiki błędu śledzenia $e_{tr} := y - y_r$ i błędu odtwarzania $e_{obs} := x - \hat{x}$ i zastanowienie się, czy przy projektowaniu wzmocnień l i k obowiązuje zasada separacji;
- stwierdzenie „iż na etapie estymacji stanu nie uwzględnia się w żadnym miejscu informacji na temat funkcji całkowitego zaburzenia systemu $f(\cdot)$ ” nie jest do końca prawdziwe – przewidywana dynamika f musi być brana pod uwagę przy projektowaniu wartości własnych obserwatora, a więc przy dobrze wzmocnień l ;
- niefortunne wprowadzono tu problem redukcji modelu skracając opis do jednego tajemniczego zdania: „uwzględnia się n pierwszych wierszy i kolumn macierzy i wektorów (2.13), separując ich części odpowiedzialne za funkcję całkowitego zaburzenia”; autor powinien dokładniej opisać w tym miejscu jak rozumie przejście od (2.13) do (2.19), jak dobiera się rząd modelu zredukowanego, tym bardziej, że będzie to istotny problem omawiany w dalszej części pracy.

Druga z podstawowych dla rozprawy struktur mbARDC jest przedstawiona w kolejnym rozdziale 2.2. Podobnie jak poprzednio, podane tam wyprowadzenia można by nieco udoskonalić:

- na rysunku 2.4 nie uwidoczniono zależności znanej funkcji f_{nl} od u i t , którą to zależność założono w opisie obiektu (2.26);
- jeżeli w (2.27) wymieniono wszystkie argumenty funkcji f , to powinna się wśród nich znaleźć różnica $\theta - \hat{\theta}$;
- dlaczego w modelach (2.27-2.41) nie uwzględniono znanych zer układu (równoważnie: znanych współczynników licznika transmitancji lub elementów macierzy c^T); Autor wykonuje ruch w tym kierunku w poprzednim rozdziale (Uwaga 2.1 str.30), gdzie niekonieczne jest to uzasadnione (model jest tam z założenia upraszczany do ciągu integratorów), a pomija ew. znane zera w układzie, w którym mogłyby być z łatwością uwzględnione;
- nieczytelnie wprowadzono redukcję modelu – przejście z (2.43) do (2.45); czy faktycznie współczynniki w przedostatnim wierszu macierzy stanu w (2.45) są takie same jak w (2.43) i odrzucono tylko współczynniki odpowiadające najwyższym potęgom w wielomianie charakterystycznym?;
- także tutaj byłoby pomocne łączne napisanie równań dynamiki błędu śledzenia $e_{tr} := y - y_r$ i błędu odtwarzania $e_{obs} := x - \hat{x}$ i zastanowienie się, czy przy projektowaniu wzmacnień l i k obowiązuje zasada separacji.

Następnie Autor podejmuje decyzję co do doboru wzmacnień obserwatora i wzmacnień w prawie sterowania, który będzie uważał za standardowy. Decyduje się na lokowanie wielokrotnych biegunów w punktach $-\omega_0$ dla obserwatora (wartości własne macierzy $A - lc^T$) i $-\omega_c$ dla wartości własnych macierzy stanu uproszczonego układu zamkniętego $A_n - b_n k^T$. W ten sposób redukuje liczbę parametrów algorytmu. Należy jednak pamiętać, że nie jest to optymalny w jakimkolwiek sensie rozkład biegunów – np. wielokrotne bieguny są szczególnie wrażliwe na błędy we współczynnikach wielomianu. Myślę, że rozważenie innych wzorów lokalizacji biegunów byłoby pożądanym kierunkiem rozwoju tej pracy.

Rozdział 2 kończy seria przykładów symulacyjnych, które na podstawie obiektu drugiego rzędu mają zilustrować właściwości sterowania mfADRC i mbADRC. Przykłady są dobrze opisane, a wnioski nie zaskakują. Brak mi trochę ilustracji odtwarzania zakłócenia totalnego (błędu lub przebiegu f), np. na rysunkach (2.8), (2.10). Brakuje też analizy wpływu

dyskretyzacji i błędów pomiarowych oraz błędów obliczania pochodnych, ale nie wszystko można zmieścić w jednej rozprawie.

Główne wyniki rozprawy są umieszczone w rozdziale 3. Autor obiecuje, że znajdziemy tam „*zbiór modyfikacji algorytmu regulacji ADRC, zarówno na podstawie literatury jak i rozwiązań autorskich, pozwalających na analizę działania oraz poprawę jakości regulacji w wybranych przypadkach*”.

Rozpoczyna od wyprowadzenia transmitancji, opisujących różne relacje w układzie regulacji, dla stałej wartości zadanej, przy liniowym obiekcie. Następnie omawia problem redukcji rzędu modelu obiektu oraz estymację wzmocnienia toru sterowania w obiekcie. Dokonuje tu dodatkowego przeglądu literatury dotyczącego tych zagadnień. Zapisanie układu ADRC przy pomocy transmitancji ma ułatwić projektowanie układu. Na skutek wcześniej przyjętych założeń parametry projektowe redukują się do trzech: bieguna obserwatora $-\omega_0$, bieguna uproszczonego UZ $-\omega_c$ i estymaty wzmocnienia sygnału sterującego $\hat{b}_0$. Postać transmitancyjna algorytmu faktycznie ułatwia analizę rozkładu biegunów dla różnych kombinacji parametrów projektowych, a tym samym właściwości dynamicznych UZ, choć te same informacje można też uzyskać z analizy rozkładu wartości własnych macierzy stanu całego układu. Autor stawia hipotezę, że lepsze wyniki uzyskuje się zaniżając wartość $\hat{b}_0$ w stosunku do aktualnej (nieznanej) wartości współczynnika wzmocnienia sterowania w obiekcie. Nie jest to całkiem nowe spostrzeżenie – w pracy [98] sformułowano je dla innego przypadku ADRC, nie jest to też zasada udowodniona na jakimkolwiek poziomie ogólności, a pokazana na przykładach układu niskiego rzędu. Jako, że modelem zredukowanym do niskiego rzędu posługujemy się często w sterowaniu ADRC, to spostrzeżenie poczynione przez Autora może być przydatne. Z drugiej strony równanie prawa sterowania (2.50) jasno pokazuje, że zmniejszanie $\hat{b}_0$ powoduje wzrost wartości sterowania, a nieprawidłowa wartość $\hat{b}_0$ oznacza gorszą kompensację znanych składników modelu obiektu – liniowego i nieliniowego. Zasadne jest więc pytanie, czy można podać jakieś zasady i granice wyboru minimalnej wartości $\hat{b}_0$? Czy można zaproponować jakiś sposób postępowania gdy nie znamy nie tylko wartości ale i znaku rzeczywistego współczynnika wzmocnienia sygnału sterującego w obiekcie?

W kolejnej sekcji Autor proponuje zastosowanie adaptacji parametrów odpowiadających liniowej składowej modelu obiektu w algorytmie mbADRC. Powołuje się tu na gotowe rozwiązanie zaproponowane w pracy [116] i stamtąd, jak rozumiem, cytuje prawa adaptacji (3.33). W pracy nie znalazłem krytycznej analizy realizowalności tych praw i poproszę o taką w odpowiedzi na recenzję. Autor stwierdza, że warunkiem poprawnego

odtworzenia parametrów jest spełnienie warunku nieustającego wymuszenia (3.39), ale nie weryfikuje tego warunku w przykładach. Kwestia stabilności układu z adaptacją powinna być rozstrzygnięta przez odpowiednie twierdzenie (udowodnione lub cytowane), a nie przez założenie (założenie 3.2), które nie jest w tym kontekście zrozumiałe. Jaką zbieżność oznacza (3.40)? Mimo tych luk w wyprowadzeniu przykłady pokazują dobre działanie układu adaptacyjnego. W opisach przykładów brakuje wartości $\mathbf{P}(0), \lambda, T_F$. Na rys.3.11 niepokoi wzrost amplitud sterowania z biegiem czasu. Mimo tych nieścisłości rozdział przekonuje o sensowności zastosowania sterowania adaptacyjnego w algorytmie mbADRC i o korzyściach, które to przynosi.

Kolejną modyfikacją algorytmu ADRC zaproponowaną przez Autora rozprawy jest zastosowanie filtru Kalmana w miejsce ESO w postaci Luenbergera. Oczywiście w literaturze można znaleźć liczne przykłady takiego rozwiązania⁵, ale Autor wprowadza swoją własną koncepcję. Przeprowadza dyskretyzację obiektu i parametryzuje algorytm filtru Kalmana jednym parametrem nazywanym λ . Nie podaje dowodu stabilności całego układu zamkniętego z filtrem Kalmana i ADRC, ale bazuje na stabilności samego filtru Kalmana. W zależności (3.55) definiuje za [45] „wielomian charakterystyczny obserwatora” i jak rozumiem do jego pierwiastków odnosi się mówiąc dalej o „biegunach estymatora”. W wielu przykładach bada rozkład tych biegunów. Czy faktycznie są to wartości własne decydujące o dynamice błędu odtwarzania w przypadku niezaszumionym? Jeśli tak, to wnioski wyciągnięte z przykładów są nieco mylące. W przykładzie 3.9 (tabela 3.3) większe wartości λ odpowiadają „biegunom estymatora” położonym bliżej okręgu jednostkowego i jakość regulacji zgodnie z rys. 3.15 pogarsza się. Tymczasem Autor pisze „większa wartość parametru λ powoduje wzrost modułów biegunów i tym samym przyspieszenie działania układu”. O jakie przyspieszenie tu chodzi? Biegun bliżej okręgu jednostkowego oznacza dłuższą stałą czasową modu (dłużej trwa stan przejściowy obserwatora). W przykładzie 3.10 mniejsza wartość czasu próbkowania poprawia jakość regulacji (rys. 3.16) a jednocześnie zgodnie z tabelą 3.4 przesuwają „bieguny estymatora” bliżej okręgu jednostkowego – czyli spowalniają odtwarzanie zmiennych stanu. W kolejnych przykładach już w jasny sposób pokazano lepszą pracę filtru Kalmana w porównaniu z ESO typu Luenbergera w przypadku zaszumionych sygnałów pomiarowych (do czego ten filtr jest powołany). We wszystkich przykładach symulacyjnych pokazano przebieg wyjścia (co oczywiste) i sterowania (co należy docenić), nie ma natomiast przebiegów błędów odtwarzania,

⁵ Np. Wei, Q.; Wu, Z.; Zhou, Y.; Ke, D.; Zhang, D. Active Disturbance-Rejection Controller (ADRC)-Based Torque Control for a Pneumatic Rotary Actuator with Positional Interference. *Actuators* **2024**, *13*, 66. <https://doi.org/10.3390/act13020066> i inne

czego trochę szkoda. W tym rozdziale i w następnym może niepokoić, ze względów numerycznych, stosowanie dużych wartości parametru λ , rzędu 10^8 - 10^{10} .

W kolejnym rozdziale 3.4 testowano możliwość zastosowania dyskretnego filtra cząsteczkowego w miejsce ESO. Pokazano jego przydatność zwłaszcza w przypadku szumów opisanych inaczej niż rozkładem Gaussa oraz przy ograniczonym sterowaniu.

Ostatnią modyfikacją ADRC zaproponowaną przez Autora jest metoda strojenia obserwatora ESO wykorzystująca wzmocnienia stanu ustalonego filtra Kalmana. Tym razem rozważono ciągły filtr Kalmana z jednym tylko parametrem, nazywanym λ i jego ustalone wartości wzmocnień przeniesiono do wzmocnień Luenbergerowskiego obserwatora ESO. Na przykładach symulacyjnych obiektów niskiego rzędu pokazano, że w ten sposób można uzyskać lepszą jakość regulacji niż w przypadku narzucania wspólnego położenia wszystkich biegunów obserwatora.

W rozdziale 4 Doktorant opisał uruchomienie i właściwości algorytmów ADRC z zaproponowanymi autorskimi modyfikacjami w trzech stanowiskach laboratoryjnych – sterowanie prędkością silnika prądu stałego, sterowanie położeniem kulki na stole o 2 stopniach swobody i stabilizacja wahadła z kołem reakcyjnym. Autor włożył dużo pracy w uruchomienie i testy sterowania na rzeczywistych stanowiskach. Rzetelnie opisał konstrukcję stanowisk i przeprowadzone eksperymenty. Porównał jakość regulacji stosując ogólnie przyjęte wskaźniki jakości, a co ważne porównał też sygnały sterujące. Pokazał nie tylko przebiegi świadczące o dobrej jakości sterowania, ale także zilustrował możliwość niepoprawnego dostrojenia i złej pracy algorytmów sterowania. Przykłady, a zwłaszcza ostatni z wahadłem z kołem reakcyjnym, dobrze ilustrują wysiłek, jaki należy włożyć w analizę i transformację modelu matematycznego, by doprowadzić go do postaci spójnej z algorytmem ADRC. W tym przykładzie Autor przyznaje, że zaproponowane i „lansowane” w całej pracy lokowanie wszystkich biegunów we wspólnym położeniu może nie dać dobrych rezultatów i proponuje lokowanie biegunów poprzez sprzężenie minimalizujące kwadratowy wskaźnik jakości z diagonalną macierzą wag. Osiągnięto poprawne efekty, mimo, że obiekt jest niedosterowany. Przeprowadzone eksperymenty potwierdziły wartość samego algorytmu ADRC i zaproponowanych przez Autora modyfikacji.

Praca kończy się rozsądnymi wnioskami podanymi w rozdziale 5.

5. Konkluzja

Ogólna ocena rozprawy i przedstawionego w niej toku dociekań naukowych jest pozytywna. Praca jest ciekawa i wartościowa, odnosi się do problemów bardzo aktualnych w sterowaniu i do istotnych zastosowań. Autor przedstawił jasno analizę problemu, w miarę poprawnie podał podstawy teoretyczne, zaproponował kilka oryginalnych pomysłów, przeprowadził badania symulacyjne i eksperymenty na rzeczywistych obiektach. Wykazał się przy tym dużym zasobem wiedzy o interdyscyplinarnym charakterze. Za oryginalne osiągnięcia pracy uważam:

- zastosowanie analizy transmitancji do opisu rozkładu biegunów układu zamkniętego i do doboru nastaw algorytmu regulacji ADRC;
- pokazanie na przykładach korzyści z zastosowania algorytmu adaptacyjnego w mbADRC;
- przetestowanie alternatywnych obserwatorów w strukturze ADRC;
- wskazanie metod strojenia ARDC bazujących na minimalnych zbiorach parametrów projektowych;
- poparcie wyników badaniami eksperymentalnymi.

Należy też docenić, że wyniki cząstkowe rozprawy zostały opublikowane w mniej lub bardziej prestiżowych czasopismach i były prezentowane na konferencjach. Jedną z tych publikacji (**Michalski Jacek**, Kozierski Piotr, Ziętkiewicz Joanna, Giernacki Wojciech, Retinger Marek, MultiPDF particle filtering in state estimation of nonlinear objects, Nonlinear Dynamics, (2021): 2165-2182) lokuje się w kwartyle Q1 kategorii Control and Systems Engineering według jednego z rankingów (<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21576&tip=sid&clean=0>).

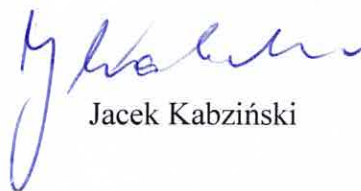
Celem komentarzy i wątpliwości przedstawionych w recenzji, choć dość licznych i krytycznych, ale nie dyskredytujących pracy, jest zwrócenie uwagi Autora na możliwości poprawy, klaryfikacji opisu i sposobu przedstawienia wyników. Pozostawiam Autorowi wyszukanie w treści recenzji tych uwag, do których chciałby się odnieść w odpowiedzi lub w prezentacji na obronie.

Podsumowując: w pracy określono poprawnie zagadnienie naukowe, rozwiązano je samodzielnie, przy użyciu właściwych metod, uzyskano nowe wyniki merytoryczne. Rozprawa dobrze prezentuje kompetencje kandydata do pracy naukowej w dyscyplinie.

Praca nie wymaga uzupełnień i wnosi wkład w rozwój dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

307 Rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i w świetle obowiązujących
308 przepisów może być dopuszczona do publicznej obrony.

309



Jacek Kabziński

310 Uwagi szczegółowe:

Lp.	Miejsce	Uwaga
1	Tytuł	Recenzent jest przeciwnikiem używania obcojęzycznych akronimów w tytułach. Autor używa określenia „algorytm regulacji z aktywną kompensacją zakłóceń” i tego określenia można użyć w tytule. Nie jest stosownym argumentem, że w recenzji też są używane angielskie akronimy.
2	streszczenie	„algorytmu regulacji bazującego na estymowanym sprzężeniu od stanu” nie sprzężenie jest estymowane a zmienne stanu, więc: na sprzężeniu od estymowanych ZS
3	streszczenie	„odsprężnięciu jego wewnętrznej dynamiki (lub jej części) jako funkcji zaburzenia” niezręcznie, chodzi o reprezentację niemodelowanej dynamiki jako zakłócenia, które zostanie skompensowane
4	streszczenie	„na wzmocnieniach stanu ustalonego filtru Kalmana.” Raczej na ustalonych wartościach wzmocnień FK
5.	streszczenie	„Zaproponowano zasady upraszczania rzędu algorytmu”- redukcji rzędu
6.	Str. 11	” część całkowitego zaburzenia” w tym miejscu nie ma jeszcze zdefiniowanego TD, więc to nie jest jasne
7.	Str. 11	„Zakładając przykładowo system sterowania temperaturą w piecu przemysłowym, zakłócenia mogą pochodzić ...” Zakłócenia nie pochodzą zakładając. Zaczynanie zdania od imiesłowu nie jest zgrzeczne. Po prostu: Na przykład, w systemie sterowania temperaturą zakłócenia pochodzą z.... Niestety, to częsty błąd stylistyczny w pracy.
8.	Str. 28	Na rysunku 2.1 i na kilku podobnych oznaczyłbym inaczej węzeł, który pełni funkcję demultipleksera i zwykły węzeł rozgałęźny.
9.	Str. 28	„wewnętrzną dynamikę” – nie ma dynamiki zewnętrznej, dynamikę modeluje całe równanie
10.	Str.28	„Projektując podstawową odmianę algorytmu ADRC wymagane jest oszacowanie” jak 7: Przy projektowaniu wymagane jest
11.	Str.30	„gdy funkcja całkowitego zaburzenia $f(\cdot)$ spełnia warunek Lipschitza.” – warunek L jest używany w podstawowym twierdzeniu o istnieniu i przedłużalności rozwiązania RR, można go znacznie osłabić; czy był sprawdzany w którymkolwiek z przykładów? Występuje w kilku miejscach, np. str. 35.
12.	Str. 31	„Na potrzeby rozpatrywanych rozważań i zastosowań w niniejszej rozprawie przyjmuje się liniową postać obserwatora stanu.” Po prostu: w tej pracy przyjmuje się ..
13.	Str. 39	(2.20), (2.48) chyba błąd w odsyłaczu
14.	Str.40	„W ogólności jego zwiększenie poprawia warunki stabilnościowe i zdolności systemu do estymacji całkowitego zaburzenia, jednak okupione jest większą wrażliwością na szumy pomiarowe.” Zwiększenie czego? Co są warunki stabilnościowe ??
15.	Str. 46	„nastąpiłaby destabilizacja” czyli co?
16.	Str.49	„uzysk jakości regulacji” - niezręczne
17.	Str. 55	„Na podstawie równania (3.1) w dziedzinie Laplace’a...” = Po wykonaniu transformacji L równania i

18.	Str. 55	„transmitancja dana jest ułamkiem niewłaściwym” – nie wiem o co chodzi
19.	Str. 75	Co to jest „synchronizacja czasu dyskretnego z ciągłym”?
20.	Str. 80	Zły podpis pod rys. 3.16
21.	Str. 95	„ze względu na jego lepsze warunki stabilności w porównaniu do Kalmana dyskretnego” niezręczne, może Rudolf Kalman był niedyskretny?
22.	Str.95	Rysunki 3.25 i wiele podobnych: mimo kolorowej legendy opisałbym wartościami parametru wzdłuż linii wykresu
23.	Str. 102	„Układ programowany jest z poziomu MATLAB/Simulink z pakietem „RPendulum Toolbox” firmy Inteco, którego okres próbkowania w czasie rzeczywistym wynosi $T_p = 0,01$ s. Okres próbkowania pakietu?
24.	Str. 106	Czy w eksperymencie, którego dotyczy rys. 4.5 ograniczono u czy tylko obciążenie na rysunku?
25.	Str.109	Może raczej pokazać przebiegi z szumem o graniczonej amplitudzie – wtedy można ocenić przenoszenie amplitudy na inne sygnały. Dotyczy wszystkich symulacji/eksperymentów z szumem.
26.	Str. 112	Proponowany model nie zawiera tarcia ani innych oporów ruchu.
27.	Str. 136	Niejasne skąd założenie 4.2
28.	Str. 139	„Wynikowo powstają uchyby resztowe od wzajemnych stopni swobody, zakładając $\hat{x}_4 \approx f_1(\cdot)$ oraz $\hat{x}_5 \approx f_2(\cdot)$ ”: Bardzo niezręczne.
29.	Str. 140	„Zapisując zależność wymuszenie-wyjście dla układu równań (4.74), otrzyma się różniczkujący charakter układu względem sygnałów sterujących z pętli odsprzęgania” Założenie niejasne, dlaczego to jest założeniem a nie właściwością, stylistycznie niedobre.

