

07-02-2025

WPŁYNEŁO

PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

dr hab. inż. Paweł Dworak, prof. ZUT

Katedra Automatyki i Robotyki

Wydział Elektryczny

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Szczecin, dnia 02 lutego 2025 r.

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

Tytuł rozprawy: **Analiza wpływu struktury modelu i metod strojenia obserwatora
w kontekście poprawy działania technik ADRC w środowiskach
deterministycznych i stochastycznych**

Autor rozprawy: **mgr inż. Jacek Michalski**

I. Cel, zakres i charakter rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy analizy i syntezy algorytmów wykorzystujących zasadę aktywnej kompensacji zakłóceń (z ang. Active Disturbance Rejection Control, ADRC) do sterowania, w ogólności nieliniowymi i niestacjonarnymi obiektami dynamicznymi, głównie o jednym wejściu i jednym wyjściu. Autor rozprawy włączył się w nurt bardzo popularnych badań nad algorytmami typu ADRC prowadzonych przez grupy badawcze z kraju i zagranicy. Postanowił z jednej strony dokonać gruntownej analizy zasad syntezy takich układów przy założeniu niepewności modelowania i w obecności nieznanymi zakłóceń, z drugiej zaproponował modyfikacje typowych, znanych z literatury, rozwiązań układów sterowania wykorzystujących mechanizmy ADRC. Proponowane przez Autora rozprawy algorytmy wykorzystują lepiej lub gorzej znany model sterowanego procesu, adaptację jego parametrów podczas pracy układu, jak również odmienny od standardowego sposób syntezy obserwatora stanu rozszerzonego (ang. Extended State Observer) wykorzystujący stacjonarny filtr Kalmana, filtr cząsteczkowy czy dla układów o większej liczbie wyjść niż wejść metody znane ze sterowania liniowo-kwadratowego LQR.

Na stronie 24 rozprawy Autor przedstawił jej tezy, główną oraz cztery tezy pomocnicze.

Główna teza rozprawy: *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.*

Tezy pomocnicze:

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

Autor w swojej rozprawie dokonał stosownych analiz teoretycznych, wskazał dotychczasowe problemy w eksploatacji układów ADRC, zaproponował odpowiednie modyfikacje i przedstawił sposoby ich implementacji. Zarówno teza główna, jak i wszystkie tezy pomocnicze zostały w pracy potwierdzone.

Wyniki analiz ilustrowane są licznymi przykładami symulacyjnymi i eksperymentalnymi przedstawiającymi powyższe problemy w sterowaniu zarówno typowymi obiektami dynamicznymi, jak i skomplikowanymi, nieliniowymi obiektami jak odwrócone wahadło, co pozwala bezpośrednio wykorzystać jej rezultaty na tym polu. Mają w mojej ocenie bardzo duże zastosowanie praktyczne, umożliwiają bowiem konstrukcję efektywnych algorytmów sterowania różnego rodzaju obiektami dynamicznymi w warunkach niepewności ich modelowania – w tym części nieliniowych – i braku możliwości przewidzenia i pomiaru oddziałujących na obiekt zakłóceń, deterministycznych i stochastycznych.

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 zaawansowanych algorytmów teorii sterowania, dużej wiedzy z zakresu modelowania układów dynamicznych, analizy, syntezy i implementacji algorytmów automatycznego sterowania.

II. Zawartość merytoryczna rozprawy

Rozprawa jest dość obszerna, liczy 180 stron i została podzielona na pięć rozdziałów oraz spisy: własnego dorobku naukowego, zamieszczonych w pracy tabel i rysunków oraz cytowanej literatury.

W rozdziale pierwszym, stanowiącym wprowadzenie do zasadniczej części rozprawy, Autor przedstawił rys historyczny rozwoju algorytmów ADRC i ESO oraz dokonał przeglądu aktualnego stanu wiedzy, w tym zakresie dając dowód znajomości zastosowań, ale też problemów i wyzwań stojących wciąż przed badaczami. Następnie dokonał przeglądu literatury, aktualnego stanu wiedzy i trendów badań na temat modelowania, estymacji niepewności, sposobów konstrukcji obserwatorów i sposobów syntezy odpowiednich regulatorów. Na tle tego przeglądu w podrozdziale 1.3 przedstawiono tezy oraz zakres pracy i treść kolejnych rozdziałów.

Zasadniczą część pracy stanowią rozdziały drugi, trzeci i czwarty. Rozpoczyna ją przedstawienie w rozdziale drugim struktury układu ADRC, sposobu modelowania obiektu sterowania, budowy rozszerzonego obserwatora stanu ESO i formułowania prawa sterowania. W podrozdziale 2.2 przedstawiono powyższe, przy założeniu znajomości części modelu obiektu sterowania, algorytmu znanego z literatury jako uogólniony ADRC (ang. Generalized ADRC, GADRC). Na bieżąco porównuje się różnice w modelach procesu i sposobie syntezy obserwatora ESO dla standardowego i rozszerzonego ADRC. W podrozdziale 2.3 przedstawiono znany i powszechnie stosowany sposób lokowania biegunów dla sprzężenia od stanu obiektu oraz obserwatora. Sposób ten, jest w dalszej części pracy punktem odniesienia dla proponowanych alternatywnych metod. Jest to postępowanie prawidłowe, ponieważ metoda zaproponowana przez Z.Gao w jego pracy z 2003 wydaje się stanowić jedyny i oczywisty sposób syntezy wykorzystywany przez większość badaczy zajmujących się tematyką ADRC i ESO. Różne aspekty syntezy (strojenia) i pracy układu ADRC zaprezentowano w rozdziale 2.4 w serii przykładów sterowania nieliniowym obiektem II rzędu. Przedstawia się tu sposoby modelowania zakłóceń, konstruowania funkcji zaburzenia, porównuje synteze układu klasycznego (model free) i uogólnionego (model based), bada się wpływ stosunku wartości parametrów modelu i biegunów sprzężenia i obserwatora na jakość regulacji. Treść rozdziału 2 uważam, za bardzo dobrze przygotowaną i zaprezentowaną, choćby z dydaktycznego punktu widzenia, co dodatkowo potwierdza znakomitą orientację i doświadczenie Autora w tej tematyce. Jedyne uwagi sformułowałbym tu do przykładu 2.6, ale ten problem poruszę w dalszej części recenzji.

Zasadniczym dla potwierdzenia tez pracy jest rozdział 3, w którym przedstawiono i omówiono szczegółowo wszystkie proponowane modyfikacje standardowych rozwiązań algorytmu ADRC. I tak, rozdział rozpoczynają rozważania, w których cały układ sterowania i poszczególne jego części modelowane są w postaci transmitancji. Ten zabieg pozwala bezpośrednio na dyskusje zagadnienia redukcji rzędu tych modeli i wykorzystanie ich do stworzenia uproszczonych, lecz wciąż skutecznych układów sterowania. Pokazano przy tym, i przedstawiono jako regułę syntezy

układu sterowania, zalety niedoszacowywania wartości wzmocnień w torze wymuszenia obiektu sterowania. W rozdziale 3.2 pokazano, jak wykorzystując znane z literatury algorytmy identyfikacji parametrów obiektu sterowania, skonstruować adaptacyjny układ ADRC. Pokazano, że takie podejście pozwala uzyskać jakość sterowania właściwą układom *model based*, nawet przy początkowym całkowitym braku wiedzy o właściwościach dynamicznych obiektu.

Kolejne podrozdziały, od 3.3 do 3.5, poświęcono analizie syntezy i działania układów ADRC w obecności zakłóceń stochastycznych. W tym celu omówiono sposób działania i syntezę filtru Kalmana. Pokazano, jak można dokonać parametryzacji układu, aby pozostawić użytkownikowi tylko jeden parametr projektowy oraz jak wykorzystać syntezę stacjonarnego filtru Kalmana, z jednej strony, do syntezy układu sterowania pracującego w warunkach obecności zakłóceń stochastycznych, z drugiej strony, do konstrukcji ESO wykorzystywanego również w układach deterministycznych, tzn. praktycznie pozbawionych zakłóceń stochastycznych.

Bardzo ciekawa wydaje się, podjęta tylko w rozdziale 3.4 i dalej w pracy nie wykorzystywana, koncepcja wykorzystania w układzie ADRC jako estymatora stanu dyskretnego filtru cząsteczkowego. Jak pokazano, wykorzystanie tego filtru może dać bardzo dobre rezultaty estymacji, a finalnie znacznie poprawić jakość sterowania, zarówno w odniesieniu do standardowych ESO, jak i analizowanych w pracy filtrów Kalmana.

Tak jak i w poprzednim rozdziale wszystkie rozważania teoretyczne są weryfikowane i ilustrowane przykładami symulacyjnymi, co znacznie ułatwia odbiór treści i podkreśla praktyczny potencjał prezentowanych w pracy rozważań i uzyskanych wyników.

Praktyczne potwierdzenie rezultatów analizy teoretycznej prowadzonej w rozdziałach drugim i trzecim, zostało zaprezentowane w rozdziale czwartym przedstawiającym wyniki licznych badań eksperymentalnych. Autor przedstawia tam różne wersje, w tym różnie sparametryzowane, układów sterowania trzema obiektami sterowania, tj. silnika prądu stałego, stołu balansującego kulką oraz odwróconego wahadła reakcyjnego. Ten dobór obiektów i kolejność prezentowania wyników, pozwoliły na stopniowe zwiększanie stopnia skomplikowania układów sterowania, wskazując, z jednej strony, przewagę proponowanych rozwiązań nad standardowymi, często uznawanymi w literaturze przedmiotu za oczywiste, a z drugiej, na kłopoty implementacyjne i ciągle otwarty potencjał badawczy przy zastosowaniu ADRC do sterowania wysoce nieliniowymi układami sterowania, takimi jak np. wahadło. W każdym z trzech prezentowanych, ale szczególnie w przypadku wahadła widać wyraźnie, jak sposób prezentacji modelu pozwala, bądź nie, na stworzenie skutecznego układu sterowania, układu który będzie nie tyle działał, lepiej lub gorzej, ale w ogóle będzie działał i spełniał stawiane zadania sterowania.

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

Spis literatury zawiera 143 pozycji, głównie z ostatnich lat. Są one prawidłowo dobrane i zostały zacytowane w treści pracy. Autor rozprawy przedstawił również osobno spis własnych publikacji

naukowych. Stanowią go 23 współautorskie publikacje opublikowanych m.in. w prestiżowych czasopiśmie i przedstawione podczas międzynarodowych konferencji naukowych.

Układ pracy oceniam jako właściwy, a czyta się ją bez jakichkolwiek problemów interpretacyjnych. Czytelnik jest prowadzony krok po kroku od zagadnień łatwiejszych do trudniejszych, a co zasługuje na szczególną uwagę, to duża liczba przykładów symulacyjnych i eksperymentalnych, które bezpośrednio i w najlepszy sposób ilustrują wszystkie zawiłości teoretyczne, implementacyjne i eksploatacyjne omawianych algorytmów sterowania. Tym samym praca zasługuje na duże uznanie.

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 z literatury idee, a uzyskując skuteczniejsze układy sterowania czyni prezentowane algorytmy zdatnymi w praktycznych zastosowaniach. Mają one szansę być wykorzystane do sterowania obiektami o nieznanej do końca dynamice, narażone na działanie również nieznanych, zmiennych zakłóceń.

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

Jak już wspominałem powyżej, uważam, że zarówno teza główna, jak i wszystkie tezy pomocnicze zostały w pracy potwierdzone, co jest głównym osiągnięciem rozprawy i samo w sobie stanowi potwierdzenie jej poziomu merytorycznego. Niemniej jednak chciałbym wskazać pewne jej aspekty i osiągnięcia zasługujące na dodatkowe podkreślenie. Są to:

- pokazanie, że niemal zawsze i regułą jest, że wykorzystanie nawet niepełnego modelu obiektu poprawia wyniki sterowania układu ADRC w porównaniu z wersją bezmodelową, tj. przyjęciem jako modelu obiektu czystego integratora;
- pokazanie, jak i w jakich warunkach, bez szkody dla jakości sterowania, w syntezie układu sterowania można uprościć model obiektu (dokonać pominięcia niedominującej, ale stabilnej dynamiki układu) otrzymując, łatwiejszy w implementacji układ sterowania niższego rzędu;
- poprzez propozycję implementacji ESO na bazie stacjonarnego filtra Kalnana, pokazanie, że możliwa jest alternatywa dla powszechnie stosowanej w ADRC, zaproponowanej przez Z.Gao, metody lokowania biegunów;
- pokazanie, że uzupełnienie algorytmu ADRC o dodatkowe techniki identyfikacji modelu obiektu i adaptacji parametrów regulatora pozwala poprawić jakość regulacji względem

rozwiązań nieadaptacyjnych szczególnie w przypadkach wystąpienia dużych błędów modelowania i zmiennych w czasie wartościach parametrów obiektu sterowania.

Ponadto praca stanowi praktyczne kompendium wiedzy w zakresie wykorzystania układów ESO i ADRC oraz układów adaptacyjnych do syntezy układów sterowania 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, choć oczywiście podczas lektury rozprawy nasuwały mi się pytania i uwagi odnośnie analizy układów, sposobów ich implementacji i wyciąganych wniosków. Część z nich pozwolę sobie wymienić poniżej:

1. W przykładach 2.3 i 2.6 Autor bada jak różne wartości parametrów modelu obiektu a_0 i a_1 wpływają na wartości wzmocnień obserwatora i sprzężenia zwrotnego od stanu (przykład 2.3) oraz jakość układu sterowania (przykład 2.6). W obu przykładach zakłada się bardzo dużą zmienność parametrów modelu, przy stałych wartościach zakładanych biegunów ω_c i ω_o . A przecież parametry ω_c i ω_o dobiera się do dynamiki obiektu, a nie odwrotnie. W mojej ocenie, duża część, jeśli nie większość z badanych regulatorów, była po prostu niewłaściwie dobrana, zbyt wolna, lub zbyt szybka w stosunku do dynamiki obiektu, co zaburza wyniki analizy eksperymentu, czyniąc je albo błędnymi, albo oczywistymi (patrz ostatni akapit rozdziału 2.4).
2. Na str. 35 Autor wskazuje ograniczenia funkcji $\text{fnl}(\cdot)$ reprezentującej znaną nieliniową część modelu: "zakłada się, że jest to funkcja gładka oraz ograniczona, spełniająca warunek Lipschitza", ale w Lemacie 2.1 żąda się dodatkowo ograniczenia wartości jej pochodnej, a to nie to samo.
3. Porównując równania (3.25) i (3.28) oraz (3.26) i (3.29) mam wrażenie, że brakuje mi co najmniej ω_c^n .
4. Na rys. 3.2 w przykładzie 3.2 trudno zauważyć, kiedy następuje utrata stabilności układu, dla jakiej wartości stosunku $\frac{b_0}{\hat{b}_0}$, na pewno poniżej 1, ale jak bardzo? Przy okazji otwartym pozostaje pytanie projektowe, jak bardzo należy niedoszacować wartości tego wzmocnienia? Wiemy, że to pomaga, ale czy zdaniem Autora dałoby się opracować jaką metodę czy eksperyment, który pozwoliłby to niedoszacowanie jakoś usystematyzować?
5. W całej pracy (rozdział 2 i 3) Autor przyjmuje bieguny $\omega_c = 10$ i $\omega_o = 50$ bez względu na rodzaj obiektu, albo przynajmniej bez odniesienia się do właściwości dynamicznych samego obiektu. W drugiej części przykładu 2.6 $\omega_o = 500$ czym znacznie przyspieszono dynamikę obserwatora. Czym kierowano się w tych wyborach?
Czy wartości te nie są po prostu zbyt duże? Widać to dobrze np. w tablicach 4.5 i 4.6, 4.9, w których porównuje się wartości wzmocnień różnych ESO. Porównywalne wartości uzyskuje się jedynie dla ESO_KF przy maksymalnych wartości parametru lambda.

6. Czy gorsze osiągi ESO w przykładach z ograniczaniem sygnałów sterujących nie wynikają między innymi z tych bardzo dużych wzmocnień czystego ESO, które przy zwiększających się błędach po prostu szybciej osiągają ograniczenia?
7. Trochę mylące jest prezentowanie na rys 3.9 i 3.10, 4.5 zmieniających się wartości parametru b , jeśli eksperyment zakładał jego stałą wartość.
8. Te same przykłady 3.4 i 3.5, czytamy „Z uwagi na zastosowanie modyfikacji (3.34) (przyjęto $\mu = 2$) obserwuje się nieznaczne obciążenie estymat parametrów w momencie dodania zewnętrznego sygnału zaburzającego”. Oczywiście, ograniczenie (3.34) wpływa na prędkość estymacji parametrów, ale czy to jest jedyny parametr powodujący „obciążenie estymat”, skoro po prostu zakłócenie zaburza wartość sygnału wyjść obiektu? Estymowane parametry zwyczajnie nie mogą zbiegać do prawdziwych wartości.
9. Lambda w stacjonarnym filtrze Kalmana. Autor pokazuje, że może ona stanowić jedyny parametr projektowy dla filtru lub docelowo ESO projektowanego z wykorzystaniem filtru (rozwiązywania równania (3.58)). Moje wątpliwości, nierozwiane po lekturze całej rozprawy, wzbudzają przyjmowane we wszystkich przykładach wartości parametru lambda. Zgodnie z założeniem jest on stosunkiem niepewności kowariancji szumów „wewnętrznych” w równaniach predykcji filtru Kalmana, do wariancji szumu pomiarowego. Mają one więc podłoże i uzasadnienie fizyczne, nawet jeśli w równaniu (3.58) rozpatrujemy jedynie ich stosunek. Skąd zatem, czasami wręcz absurdalnie wysokie, wartości parametru lambda. Na rysunkach 3.14 i 3.26 lambda prezentowana jest w skali logarytmicznej, naprawdę potrzebujemy badać co by było, gdyby lambda miała wartość 1 z 20 zerami? Czy przyjmowanie bardzo dużych wartości lambda 10^8 i większych, nie powoduje, że praktycznie nie bierzemy pod uwagę jakiegokolwiek predykcji, tylko opieramy się na samych pomiarach? Jak to należy interpretować? Co oznacza $\lambda = 10^{14}$ w przykładzie 4.12?
10. Uwaga będąca konsekwencją poprzedniej. We wszystkich symulacjach i eksperymentach wartości lambda nie odpowiadały przyjmowanym wariancjom niepewności procesowych i pomiarowych.
11. W przykładzie 3.13 w pkt. 3 „Aktualizacja” zakłada się, że rozkład wartości wyjściowej y będzie rozkładem normalnym, tak jak rozkład zakłócenia. Ale we wzorze mamy jeszcze kwadrat stanu obiektu, który to stan też jest zaszumiony. Jeśli wariancję szumów procesowych przyjmujemy jako 10 a zakłóceń pomiarowych 1 (patrz str. 88), to rozkładowi y będzie chyba jednak bliżej do chi-kwadratowego niż przyjmowanego dalej normalnego. To jest spore utrudnienie dla prawidłowej analizy i syntezy każdego filtru. Choć niewątpliwie, symulacje pokazują, że pomimo tych uproszczeń, algorytm dawał sobie radę znakomicie.
12. Na str. 102 Autor pisze „Zakładając pomijalnie małą wartość indukcyjności z modelu (4.8) $L \rightarrow 0$, można uprościć dynamikę (4.10) przez pominięcie niedominującej stałej czasowej T_2 ”. To chyba tak łatwo nie działa, tzn. podstawienie $L=0$ w (4.8) nie uprości biegunu w ten sposób, z (4.10) nie otrzymamy bezpośrednio (4.11).

13. K_y w równaniu (4.25) jest przyspieszeniem, powinno więc mieć jednostkę fizyczną $\frac{m}{s^2}$.
14. Trudności w wykorzystaniu ADRC dla mocno nieliniowych obiektów sterowania z nietypowym sposobem sterowania (tu różniczkowaniem w torze wejściowym) widać wyraźnie w wynikach sterowania odwróconym wahadłem, gdzie prawidłową ciągłą pracę urządzenia osiąga się jedynie dla jednego z rozwiązań, LQR z rys. 4.43. Jak sam Autor zauważa na str. 143 w przypadku pozostałych układów: „Nastawy algorytmu regulacji każdorazowo dobrane zostały tak, by zapewnić stabilne działanie układu zamkniętego. W przypadku niewielkiej nawet manipulacji współczynnikami zaobserwować można było destabilizację układu, bez zauważalnego wpływu na jego odpowiedzi w obszarze działania stabilnego.” Powyższe pokazuje dobitnie, że wyniki uzyskane w eksperymencie z LQR świadczą o prawidłowości analizy, właściwej implementacji układu, po prostu dużej wiedzy i dużych umiejętności Autora.

IV. Uwagi szczegółowe

Rozprawa napisana jest starannie, poprawnym językiem, jest również dobrze zredagowana pod względem edycyjnym. W tak obszernym opracowaniu trudno jednak całkowicie ustrzec się drobnych błędów, zarówno językowych jak i edycyjnych. Ich szczegółowe wskazywanie, przy ogólnie bardzo dobrej ocenie opracowania, wydaje się być niepotrzebne. Pozwolę sobie wspomnieć tylko o dwóch drobiazgach. Osobiście listy najważniejszych symboli i akronimów umieściłbym jeszcze przed *Wprowadzeniem*, bo obecnie wyglądają jakby znajdowały się w środku podrozdziału Rys historyczny, którego treścią nie są i do niego nie pasują. To, że skala dla parametru λ na rysunkach na str. 77 i 95 jest logarytmiczna, trudno dostrzec nawet w okularach, co w pewnym momencie znacznie utrudniło odbiór treści pracy.

V. Wnioski końcowe

Dyplomant w recenzowanej Rozprawie jednoznacznie dowiódł swoich umiejętności systematycznej analizy problemu technicznego, dużej wiedzy z zakresu teorii sterowania, 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. Jacka Michalskiego, pt. „Analiza wpływu struktury modelu i metod strojenia obserwatora w kontekście poprawy działania technik ADRC w środowiskach deterministycznych i stochastycznych” 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.

