

Zielona Góra, 13.03.2019r.

Wojciech Paszke  
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych  
Uniwersytet Zielonogórski  
e-mail: w.paszke@issi.uz.zgora.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgra inż. **Wojciecha Adamskiego**,  
zatytułowanej:  
„*Sterowanie i projekt sterowca autonomicznego*”

Podstawą formalną do wykonania niniejszej recenzji jest uchwała Rady Wydziału Informatyki Politechniki Poznańskiej nr 2019-24-168 z dnia 22.01.2019r. oraz pismo nr DI-63-05/2012 podpisane przez dra hab. inż. Andrzeja Jaskiewicza, Dziekana Wydziału Informatyki Politechniki Poznańskiej w Poznaniu.

## Problem badawczy i jego znaczenie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy ważnego problemu sterowania sterowców z deficytem sygnałów sterujących. Deficyt ten wynika z braku możliwości bezpośredniego wpływu na ruch sterowca w jednym z kierunków, co szczególnie utrudnia syntezę algorytmu sterowania ruchem sterowca. Dlatego sformułowana została następująca teza pracy:

*Dla obiektu o dynamice określonej w sposób przybliżony oraz przy braku wymuszenia w stopniu swobody poprzecznym do dominującego kierunku ruchu istnieje pomocniczy błąd konfiguracji  $\mathbf{e}$  taki, że możliwe jest bezpośrednio oddziaływanie wejść sterujących na każdą jego składową oraz dla  $\|\mathbf{e}\| \leq \delta$  błąd śledzenia pozycji opisany w układzie bazowym jest ograniczony przez  $\hat{\delta} \geq \|\mathbf{e}^b\|$  gdzie  $\delta$  i  $\hat{\delta}$  oznaczają dodatnie stałe. Istnieje również reguła sterowania:*

$$\tau = \tau(\mathbf{e}(t), \dot{\mathbf{e}}(t))$$

*która zapewnia zbieżność błędu pomocniczego  $\mathbf{e}$  do pewnego otoczenia zera o promieniu  $\delta$ .*

Bezpośrednią motywacją do postawienia takiej tezy był brak algorytmów sterowania pozwalający na realizowanie zadania śledzenia trajektorii w przestrzeni trójwymiarowej, bez konieczności dekompozycji zadania na sterowanie dwoma podsystemami: jednym związanym z regulacją wysokości oraz drugim dotyczącym śledzenia trajektorii planarnej. Zaproponowany przez Autora algorytm sterowania rozwiązuje problem ruchu w przestrzeni trójwymiarowej bez separacji zadań z naciskiem położonym na możliwość praktycznej implementacji. Dlatego właśnie praca podzielona jest na dwie główne części, które odpowiednio przedstawiają istotę

problemu i jego rozwiązanie. Pierwsza część zawiera rozważania teoretyczne, które opisane są jasno i z wymaganą precyzją. Dodatkowo, do zaproponowanych twierdzeń załączone są klarowne dowody, co znacząco ułatwia ich zrozumienie. Druga część przedstawia weryfikację eksperymentalną proponowanego algorytmu sterowania na modelu laboratoryjnym sterowca. Niewątpliwie więc można stwierdzić, że obszar badań jest całościowy i kompozycja pracy jest również całościowa. Zdaniem recenzenta zamieszczone w pracy rezultaty kwalifikują jej charakter jako "eksperymentalny" ze względu na dużą przydatność praktyczną oraz liczne wyniki walidacji laboratoryjnej.

Należy również podkreślić, że rozważany problem jest jednak nietrywialny, a załączenie szczegółowych eksperymentów laboratoryjnych jest naprawdę rzadko spotykane, gdyż większość dostępnych pozycji literaturowych zawiera jedynie symulacje komputerowe. Co więcej, eksperymenty zostały wykonane przy wykorzystaniu stanowiska laboratoryjnego wykonanego przez autora pracy, co również zasługuje na uznanie.

Szczególnie mocno należy w tym miejscu podkreślić, że problemy analizy i projektowania sterowań dla autonomicznych sterowców, znajduje się w centrum uwagi wielu naukowców na świecie. Dlatego przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska doskonale wpisuje się w ten trend i ma możliwość stać się ważną publikacją w tematyce sterowania autonomicznymi sterowcami. Autor przekonuje czytelnika do proponowanego podejścia wykorzystującego sterownie ślizgowe, co jest zrozumiałe ze względu na możliwość kompensacji nieliniowości rzeczywistego obiektu oraz zmian jego parametrów. Recenzent nie jest jednak przekonany, że proponowane prawo sterowania nie może w pełni zastąpić tradycyjnych struktur sterowania, zwłaszcza w przypadku przeprowadzanych eksperymentów laboratoryjnych, gdzie część parametrów obiektu sterowania jest niezmienna w czasie. Atrakcyjnym wydaje się stosowanie sterowania ślizgowego w przypadku lub zmiany parametrów układu, do tego stopnia, że klasyczny regulator nie będzie w stanie zapewnić poprawnego działania sterowca.

Rozprawa wraz z bibliografią ma objętość 108 stron. Dodatkowo zamieszczone jest streszczenie w języku polskim i angielskim, spis publikacji Autora oraz spis treści. Taki układ pracy uważam za dostosowany do tematyki i opisywanego zakresu badań. Co więcej, praca jest relatywnie prosta w czytaniu i zrozumieniu, gdyż Autor dokładnie rozpisuje wszystkie wyrażenia matematyczne i zamieszcza dużą liczbę eksperymentów numerycznych oraz laboratoryjnych. Rozprawa jest przygotowana w języku polskim i pod względem poprawności językowej nie budzi moich zastrzeżeń. Przygotowanie pracy w systemie składu tekstu Latex znacznie polepsza formalną stronę pracy.

## Poprawność

Choć generalnie praca jest poprawna to jednak Recenzent jest zobowiązany do wskazania jej niedostatków. Do istotnych słabości tej pracy należy zaliczyć następujące kwestie:

- Brak jasnego, przekonującego, zwłaszcza eksperymentalnego uzasadnienia, że zaproponowane podejście przewyższa znacznie możliwą do uzyskania jakość sterowania z użyciem klasycznych metod sterowania (np. PID). Choć, jak to zostało już podkreślone wcześniej, Autor doskonale motywuje konieczność stosowania sterowania ślizgowego to jednak w przypadku badań laboratoryjnych dla małych prędkości sterowca przewaga zaproponowanego podejścia wydaje się jednak mała. W tym aspekcie ważna byłaby próba połączenia sterowania ślizgowego z innymi metodami sterowania (PI lub PID), gdzie po osiągnięciu określonej wartości, będzie następowało odłączenie algorytmu ślizgowego i przełączenie sterowania na algorytm, w którym nie występuje już zjawisko

chatteringu.

- Należy wspomnieć, że wpływ zmienności wybranych parametrów fizycznych sterowców może być ujęty z użyciem sterowania LPV (ang. *Linear Parameter-Varying*) zwłaszcza, że zakres oraz prędkość zmian niektórych parametrów jest ogólnie znana lub bezpośrednio może być zmierzona (np. zmiana wyporności gazu nośnego w odniesieniu do wysokości n.p.m.).
- Mało szczegółowy opis metody lub stosowanego podejścia do doboru macierzy wzmocnień  $K$  (zdefiniowane w równaniu (57)). Czytelnik traci trochę orientację jak te parametry zostały dobrane w równaniu (142). Oczywiście, Autor wspomina w części dotyczącej planu przyszłych badań, że te kwestie powinny być lepiej zbadane (w sensie adaptacyjnego doboru tych wzmocnień), to jednak dokładniejszy opis postępowania w ich doborze powinien być zamieszczony w pracy.
- Fuzja danych z czujników pomiarowych i kamery powinna być zdaniem Recenzenta znacznie dogłębniej przedstawiona, gdzie należy ująć możliwości wprowadzania zakłóceń oraz błędów w torach pomiarowych; opis na stronie 23 jest naprawdę bardzo ogólnikowy, a schemat zamieszczony na rys. 9 mało precyzyjny.
- nazewnictwo niektórych pojęć budzi wątpliwości; przykładowo na stronie 62 wyrażenie "dochodzi do stabilizacji układu" powinno być zastąpione przez "dochodzi do uzyskania stanu ustalonego"; poza tym powinniśmy używać pojęcia "pasmo przenoszenia" zamiast "uzyskiwania częstotliwości pętli sterowania" (strona 21); równocześnie unikać należy mało dokładnego (rozmytego) określania rezultatów czy wartości parametrów, np.: "niewielkie pogorszenie", "silne zakłócenie", "skuteczne ograniczenie", "znaczące zmiany", "mniejsza amplituda" itp.

Zawarcie tych powyższych kwestii znacznie wzbogaciłoby zawartość pracy i podkreśliły kompletność przeprowadzonych rozważań. Pomimo tych wątpliwości, rozdział 6 zawiera oryginalne i ważne rezultaty Autora, które potwierdzają, że Autor potrafi rozwiązać wskazany problem naukowy poprzez zdefiniowanie odpowiednich błędów pomocniczych i zaproponowanie odpowiedniego prawa sterowania. Wyniki analityczne zostały potwierdzone serią eksperymentów symulacyjnych i laboratoryjnych.

## Wiedza kandydata

Przedstawione w recenzowanej pracy rezultaty badań Autora odpowiadają na aktualne zapotrzebowanie dotyczące sterowania autonomicznymi maszynami latającymi. Dlatego jednoznacznie uważam, pomimo opisywanych powyżej pewnych słabych stron, że osiągnięcia Autora w zakresie badań teoretycznych wraz z odpowiednią weryfikacją symulacyjną i eksperymentalną są oryginalne i stanowią istotny wkład do dyscypliny *Automatyka i Robotyka*. Podkreślić należy też, że przedstawione rozwiązanie problemu jest kompletne i uwzględnia aktualny stan wiedzy, czego potwierdzeniem jest odwołanie się do prestiżowych publikacji w rozważanej tematyce. Szczególnie widoczne to jest w rozdziale 2, gdzie Autor przedstawia dogłębną motywację podjęcia problemu wraz ze wskazaniem wszystkich wad i zalet istniejących rozwiązań. Duża część opisu uwypukla potrzebę stosowania sterowania ślizgowego, które uwzględnia występowanie nielinowości, zakłóceń oraz niepewności. Wskazane pozycje bibliograficzne uważam za dobrze dobrane i potwierdzające rozeznanie Autora

w aktualnych pozycjach z zakresu pracy. Opisany w rozdziale 6 opracowany przez Autora algorytm sterowania, w którym ujęto nowe definicje błędu pomocniczego, pozwala na uzyskanie zakładanych wskaźników jakościowych regulacji pomimo tego, że obiekt jest niedosterowany i występują niepewności, zakłócenia oraz szumy pomiarowe. Dlatego algorytm ten wraz z załączonymi wynikami eksperymentów laboratoryjnych (zamieszczonych w rozdziale 8) stanowi potwierdzenie jego wyjątkowej wiedzy i umiejętności praktycznych. Dodatkowo, uzyskane rezultaty stanowią znaczący wkład do dyscypliny *Automatyka i Robotyka*.

Ponadto, o odpowiedniej wiedzy Autora świadczy jego dorobek publikacyjny, który obejmuje 13 pozycji literaturowych. Na szczególną uwagę zasługują następujące publikacje:

1. Wojciech Adamski i Przemysław Herman. "On use of equations of motion for two-rotor airship". W: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 226.8 (2012), s. 2093–2103. issn: 0954-4062. doi: 10.1177/0954406211429762.
2. Przemysław Herman i Wojciech Adamski. "Nonlinear trajectory tracking controller for a class of robotic vehicles". W: Journal of the Franklin Institute, vol.354 no 13 (2017), s. 5145–5161. issn: 00160032. doi: 10.1016/j.jfranklin.2017.05.040.
3. Przemysław Herman i Wojciech Adamski. "Non-adaptive velocity tracking controller for a class of vehicles". W: Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, vol. 65 no 4 (2017), s. 459–468. issn: 02397528. doi: 10.1515/bpasts-2017-0051.

Powyższe osiągnięcia publikacyjne wyróżniają się w odniesieniu do innych znanych mi prac doktorskich. Z drugiej jednak strony, Autor pracy występuje w dwóch ostatnich publikacjach jako drugi autor, co sugeruje, że jego udział w uzyskaniu opublikowanych wyników nie był dominujący. Mimo to, publikacje te świadczą, że Wojciech Adamski wykazał się odpowiednią wiedzą z zakresu dyscypliny *Automatyka i Robotyka*. Na szczególne uwypuklenie zasługuje również to, że przeprowadzenie wybranych dowodów stanowiących przedmiot jego osiągnięć wymagało biegłego opanowania aparatu matematycznego z zakresu teorii sterowania.

## Inne uwagi

Rozprawa jest zredagowana bardzo starannie ale pojawiają się również pewne drobne uchybienia ze strony edycyjnej. Wśród nich należy wymienić:

- brak kropek lub przecinków na końcu wielu równań lub wzorów, np.: (38), (66)-(72), (83), (104), (128);
- błędne wyrównanie równań wielowierszowych, np.: równanie (74);
- brak definicji niektórych symboli, np.  $0$  w równaniach (39) i (40).

Wymienione uchybienia możemy jednak zakwalifikować jako bardzo drobne i dlatego nie wpływają one absolutnie na jakość pracy oraz poprawność przekształceń matematycznych.

## Podsumowanie

Biorąc pod uwagę opinie zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania zdefiniowane przez artykuł 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym (z późniejszymi zmianami) moja ocena rozprawy pod względem trzech podstawowych kryteriów jest następująca:

A. Czy rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problem naukowego? (wybierz jedną opcję stawiając znak X)

- Zdecydowanie TAK
- Raczej TAK
- Trudno powiedzieć
- Raczej NIE
- Zdecydowanie NIE

B. Czy po przeczytaniu rozprawy zgadzasz się, że kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Automatyka i Robotyka?

- Zdecydowanie TAK
- Raczej TAK
- Trudno powiedzieć
- Raczej NIE
- Zdecydowanie NIE

C. Czy kandydat umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej?

- Zdecydowanie TAK
- Raczej TAK
- Trudno powiedzieć
- Raczej NIE
- Zdecydowanie NIE

Podsumowując, po zapoznaniu się z przedłożoną rozprawą doktorską mgr. inż. Wojciecha Adamskiego, stwierdzam, że z nadmiarem spełnione są wymagania zawarte w stosownej ustawie. Oznacza to, że mgr inż. Wojciech Adamski przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, posiada ogólną wiedzę w dyscyplinie naukowej *Automatyka i Robotyka* oraz umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. W związku z tym, wnioskuję o dopuszczenie niniejszej pracy do publicznej obrony.

Wojciech Paske