

Warszawa, 11 listopada 2015 r.

dr hab. inż. Edyta Ładyżyńska-Kozdraś, prof. PW  
Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki  
02-525 Warszawa, ul. Św. A. Boboli 8

## RECENZJA

**Rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Andrzeja Felisiaka  
pt. „CONTROL OF SPACECRAFT FOR RENDEZVOUS MANEUVER  
IN AN ELLIPTICAL ORBIT”  
wykonanej na Politechnice Wrocławskiej  
pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Krzysztofa Sibilskiego  
i promotorstwem pomocniczym dr inż. Wiesława Wróblewskiego**

### 1. Wprowadzenie oraz uwagi ogólne o rozprawie

Przedstawiona do recenzji rozprawa, autorstwa mgr inż. Piotra Felisiaka, stanowi rozważania teoretyczne dotyczące zagadnienia sterowania statkiem kosmicznym wykonywującym manewr spotkania z obiektem docelowym (np. stacją kosmiczną).

Orbitalny manewr spotkania jest jednym z kluczowych manewrów w technice kosmicznej. Polega on na przyjęciu przez statek kosmiczny i satelitę docelowego w tej samej chwili czasu takich samych wektorów prędkości oraz położenia względem Ziemi. Studia literaturowe wykazują, że zdecydowana większość manewrów spotkania została opisana na orbitach kołowych i jest realizowana przy niewielkich odległościach początkowych, mniejszych niż jeden kilometr. Dodatkowo, stosowane dotychczas metody sterowania wykorzystują zlinearyzowane modele ruchu względnego, co w negatywny sposób wpływa na dokładność procesu sterowania.

Autor w swej dysertacji podjął badania teoretyczne dotyczące zagadnienia sterowania statkiem kosmicznym w celu wykonania manewru spotkania przy założeniu, że satelita

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

data 18-11-2015

WS/1475

docelowy przemieszcza się po keplerowskiej orbicie eliptycznej. W celu znalezienia quasi-optymalnej trajektorii manewru mgr inż. Piotr Felisiak zaproponował metodę opartą o sterowanie z przesuwym horyzontem predykcji, przy wykorzystaniu pełnego nieliniowego i niestacjonarnego modelu ruchu względnego. Poprawność procesu modelowania matematycznego oraz budowy algorytmu regulacji predykcyjnej poparta została przykładami symulacji komputerowych ilustrujących proces sterowania statkiem kosmicznym w celu wykonania manewru spotkania na orbicie eliptycznej.

Poruszane przez Autora w dysertacji problemy badawcze należą do zagadnień interdyscyplinarnych łączących wybrane elementy mechaniki lotów kosmicznych oraz teorii sterowania. Analiza procesu modelowania matematycznego dynamiki ruchu względnego statku kosmicznego na orbicie eliptycznej posłużyła do sformułowania pełnego, nieliniowego oraz niestacjonarnego (nieautonomicznego) modelu jego ruchu względnego, który następnie został wykorzystany jako model wewnętrzny dla regulatora predykcyjnego, pozwalając na predykcję wyjścia oraz estymację stanu procesu.

## **2. Charakterystyka rozprawy**

Recenzowana praca doktorska napisana została w języku angielskim. Obejmuje ona 113 stron tekstu. Zawiera streszczenia w języku angielskim i polskim, wykaz ważniejszych oznaczeń, spis 40. rysunków i 10. tabel zamieszczonych w tekście rozprawy oraz bibliografię obejmującą 86 pozycji literaturowych, które zostały uporządkowane w kolejności występowania odwołań w tekście pracy. Merytoryczna część rozprawy zredagowana została w ośmiu głównych rozdziałach z wyodrębnieniem wprowadzenia, pięciu rozdziałów zasadniczych oraz dwóch rozdziałów podsumowujących. Dodatkowo w pracy zawarty został załącznik opisujący model ruchu względnego Tschaunera-Hempla dla przypadku eliptycznego.

W rozdziale pierwszym, stanowiącym wprowadzenie, Autor określił istotę podjętego tematu badawczego, podał cel i zakres pracy, omówił pokrótce sposób jej realizacji, a także dokonał wyczerpującego przeglądu literatury dotyczącej sterowania statkiem kosmicznym w trakcie wykonywania orbitalnego manewru spotkania.

W rozdziale drugim Autor przedstawił sformułowanie modelu matematycznego ruchu względnego statku kosmicznego, który w dalszej części rozprawy posłużył do opracowania modelu regulatora predykcyjnego. Model został wprowadzony w sposób jasny i szczegółowy,

począwszy od podstawowych praw mechaniki orbitalnej, poprzez budowę nieliniowych równań dynamiki ruchu względnego i na sformułowaniu modelu masowego satelity skończywszy.

Rozdział trzeci opisuje zasady i teoretyczne aspekty sterowania predykcijnego, służąc tym samym jako wprowadzenie do opisu zastosowanego algorytmu sterowania.

W rozdziale czwartym Autor określa strategię sterowania zaproponowaną jako rozwiązanie problemu sformułowanego w niniejszej dysertacji. Autor w sposób szczegółowy przedstawił opis zaproponowanego przez siebie algorytmu sterowania, a także wersję alternatywną przewidzianą do celów porównawczych.

W rozdziale piątym Autor przedstawił szczegółowo sposób realizacji algorytmu numerycznego, który został użyty przy analizach komputerowych zaimplementowanych w środowisku MATLAB z wykorzystaniem technik programowania obiektowego.

W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych orbitalnego manewru spotkania, przy czym Autor uwzględnił w nich różne warunki początkowe oraz różne konfiguracje zastosowanego regulatora predykcijnego.

Rozdział siódmy stanowi podsumowanie i interpretację uzyskanych w pracy wyników. Autor przeprowadza ogólną ocenę zaproponowanego rozwiązania, przedstawia jego ograniczenia i zakres stosowalności porównując jakość sterowania pomiędzy wybranymi regulatorami.

W rozdziale ósmym Autor formułuje najważniejsze wnioski uzyskane w trakcie pracy, a także wskazuje, ewentualne kierunki dalszych modyfikacji i rozwoju proponowanego rozwiązania.

Na podstawie powyższej analizy stwierdzam, że monografia została zredagowana właściwie pod względem merytorycznym co oznacza, że jej układ i treść stanowią przejrzystą, logiczną całość. Tytuł pracy ściśle odpowiada opisywanym w niej zagadnieniom. Układ poszczególnych rozdziałów jest właściwy i proporcjonalny w stosunku do wagi prezentowanej w nich tematyki. Dobór rysunków oraz wykaz literatury został sporządzony poprawnie. Używana w pracy nomenklatura techniczna jest prawidłowa. Prezentowane treści i układ graficzny pracy stanowią logiczną całość. Uważam, iż opiniowana rozprawa mgr inż. Piotra Felisiaka wnosi cenny wkład naukowy do zagadnień modelowania orbitalnego ruchu względnego oraz metod sterowania automatycznego, ze wskazaniem na budowę algorytmu sterowania predykcijnego, rozszerzając zakres wiedzy na ten temat.

### 3. Ocena merytoryczna rozprawy

Wybór tematyki rozprawy uważam za aktualny i perspektywiczny. Został on trafnie dobrany i profesjonalnie zrealizowany zarówno z teoretyczno-poznawczego, jak i utylitarnego punktu widzenia. Zakres wykonanych przez Autora analiz oraz wybór metod badawczych jest trafny i wystarczający do uzyskania postawionego celu pracy, którym było opracowanie algorytmu regulacji predykcyjnej pozwalającego na spełnienie warunków stawianych statkowi kosmicznemu wykonującemu manewr spotkania na orbicie eliptycznej.

Do najważniejszych wyników badań i analiz, będących oryginalnymi osiągnięciami naukowymi Pana mgr inż. Piotra Felisiaka, należą:

1. Opracowanie pełnego, nieliniowego oraz niestacjonarnego modelu matematycznego dynamiki ruchu względnego statku kosmicznego poruszającego się po orbicie eliptycznej. Posłużył on jako model wewnętrzny dla regulatora predykcyjnego, pozwalając na predykcję wyjścia i estymację stanu procesu. Model ten w bezpośredni sposób uwzględnia zależność dynamiki procesu od masy gazu pędnego wyrzucanego przez silniki statku kosmicznego, podczas gdy większość stosowanych do tej pory metod sterowania wykorzystuje wyłącznie modele zlinearyzowane. Wpłynęło to pozytywnie na dokładność procesu sterowania, co wykazał Autor w przeprowadzonych symulacjach numerycznych.
2. Sformułowanie zaproponowanej przez Autora metody predykcji wyjścia uwzględniającej zmienność parametrów modelu wzdłuż horyzontu predykcji, co pozwoliło na dokładniejszą prognozę wyjścia procesu. Uwzględnienie zmienności dynamiki systemu zostało zrealizowane dzięki mechanizmowi predykcji parametrów modelu zależnych od czasu, trajektorii stanu oraz trajektorii sterowania.
3. Zastosowanie heurystycznej metody wstępnej estymacji przyszłych parametrów modelu umożliwiającej uniknięcie bezpośredniego uwzględniania w procedurze optymalizacji zależności parametrów modelu od trajektorii sterowania, co prowadziłoby do zagadnienia optymalizacji nieliniowej.
4. Sformułowanie algorytmu sterowania predykcyjnego korzystającego z wymienionych wyżej metod. Jednym z założeń podjętych na etapie projektowania algorytmu sterowania było rozszerzenie przestrzeni warunków początkowych, dla których możliwe jest osiągnięcie celu sterowania, co umożliwiło zwiększenie początkowej separacji pomiędzy statkiem kosmicznym a obiektem docelowym.

5. Przeprowadzenie szeregu symulacji numerycznych, które wykazały, że zaproponowany algorytm regulacji predykcyjnej pozwala na spełnienie warunków stawianych manewrowi spotkania na orbicie eliptycznej wpływając na poprawę jakości sterowania. Przedstawiony przez Autora algorytm, zgodnie z zamieszczonymi wynikami, pozwala na sterowanie dla manewru z początkową separacją pomiędzy statkami ponad 36 000 km, co znacznie przekracza zakres poprawnego działania większości obecnych algorytmów sterowania orbitalnym ruchem względnym.

Monografia została przygotowana w sposób staranny. Stanowi logiczną, spójną całość dobrze zredagowaną zarówno pod względem merytorycznym, jak i edytorskim. Tym niemniej podczas jej lektury można dostrzec drobne niedociągnięcia. Najważniejsze z nich, wraz z nasuwającymi się pytaniami przedstawiam poniżej.

1. Pewnym mankamentem rozprawy jest brak w tekście jednostek miar używanych wielkości fizycznych, co ułatwiałoby czytelnikowi interpretację oznaczeń, a nierzadko również wyprowadzanych wzorów i przytaczanych zależności.
2. Brak rysunku obrazującego układ odniesienia  $\{\hat{i}_e, \hat{i}_p, \hat{i}_h\}$ . Jak on się ma do układu  $\{\hat{i}_r, \hat{i}_\theta, \hat{i}_h\}$  przedstawionego na rys. 2.3?
3. Czy i w jaki sposób na wyniki przeprowadzanych symulacji numerycznych wpływ ma zmiana warunków początkowych układu?
4. Jakie kryterium zostało zastosowane przy doborze optymalnych parametrów regulatora?

Wymienione uwagi szczegółowe nie mają wpływu na ogólną ocenę rozprawy, która niewątpliwie wnosi cenny wkład w analizę procesu modelowania oraz rozwój systemów sterowania w technice kosmicznej.

#### 4. Podsumowanie

Rozprawę doktorską mgr inż. Piotra Felisiaka oceniam bardzo wysoko. Jest ona opracowaniem oryginalnym i świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu merytorycznym Autora. Wszystkie podejmowane w dysertacji wątki są ważne zarówno w aspekcie teoretycznym, jak i użytkowym. Doktorant wykazał się nie tylko obszerną wiedzą z zakresu



mechaniki lotów kosmicznych, modelowania matematycznego, teorii sterowania oraz metod numerycznych, ale również dużą dojrzałością naukową w formułowaniu zagadnień, realizacji rozwiązań i wyciąganiu właściwych wniosków. Stanowi to podstawę do stwierdzenia, iż mgr inż. Piotr Felisiak ma bardzo dobre przygotowanie teoretyczne i warsztatowe do twórczej pracy naukowej.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania stawiane przez aktualnie obowiązującą Ustawę z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65). Stawiam wniosek o **przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Piotra Felisiaka do jej publicznej obrony.**

Dodatkowo wnioskuję o **wyróżnienie rozprawy** za:

- podejmowane w pracy ważne tematy, wnoszące cenny wkład naukowy w rozwój zagadnień sterowania automatycznego statków kosmicznych, ze wskazaniem na budowę algorytmu sterowania predykcyjnego;
- interdyscyplinarność przedstawionej tematyki;
- dojrzałość Doktoranta jako badacza zaangażowanego w poszukiwanie narzędzi do znalezienia rozwiązania problemu orbitalnego manewru spotkania.

