

dr hab. inż. Tomasz Rogalski, prof. PRz  
Politechnika Rzeszowska  
Al. Powstańców Warszawy 12  
35-959 Rzeszów  
Katedra Awioniki i Sterowania

Rzeszów 02.02.2015

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Damiana Kordosa  
**p.t. "Synteza algorytmów sterowania samolotem bezzałogowym"**

### ***1. Uwagi ogólne na temat rozprawy***

Rozprawa doktorska przedstawiona przez doktoranta jest stosunkowo obszerna, składa się z pięciu rozdziałów - łącznie 157 stron oraz spisu literatury - 2 strony - zawierającego 70 pozycji w tym 6 odnośników do stron internetowych. Dodatkowo 2 strony zajmują streszczenia w języku polskim i w języku angielskim.

Opiniowana praca powstała w Katedrze Awioniki i Sterowania Politechniki Rzeszowskiej, w której od wielu lat we współpracy z jednostkami przemysłowymi prowadzone są prace badawcze nad układami automatycznego sterowania samolotami

W pracy autor poruszył zagadnienia związane z automatycznym sterowaniem samolotem bezzałogowym będącym częścią większego systemu bezzałogowego (z ang. RPAS - **R**emotely **P**iloted **A**ircraft **S**ystem). Powyższa tematyka jest trudna ale cieszy się dużym zainteresowaniem ze strony badaczy z różnych ośrodków naukowych. Podjęte w pracy badania nie dają odpowiedzi na wszystkie pytania związane z doбором struktury układu sterowania oraz syntezą praw sterowania samolotem bezzałogowym będącym elementem systemu RPAS. Jednak, zaproponowane przez doktoranta rozwiązanie może być korzystną alternatywą dla dotychczas stosowanych. Przy czym, do potencjalnych korzyści należy między innymi zaliczyć: uproszczenie struktury części pokładowej autopilota, zwiększenie możliwości funkcjonalnych systemu PRAS.

## 2. Charakterystyka rozprawy

Rozdział pierwszy jest jednocześnie wstępem, stanowi wprowadzenie do poruszanej tematyki. Również w tej części pracy Autor formułuje jej główny cel i tezę. Postawiona teza

"Algorytmy sterowania zastosowane w systemie bezzałogowym umożliwiają kontrolę nad samolotem w sytuacji, gdy obiekt sterowany jest z poziomu naziemnej stacji kontroli lotów"

sugeruje, że opisywane badania skupiły się na opracowaniu, innej niż dotychczas stosowana, struktury systemu sterowania dla samolotów bezzałogowych, z algorytmami sterowania i nawigacji zaimplementowanymi w naziemnej części systemu RPAS.

W rozdziale drugim przedstawiono strukturę systemu sterowania samolotem oraz systemu informatycznego samolotu i stacji kontroli lotów. Czyli właściwy obiekt badań doktoranta.

W rozdziale trzecim przedstawiono narzędzia, jakie Autor wykorzystał w badaniach zmierzających do udowodnienia postawionej we wstępie tezy. Należy do nich między innymi zaliczyć:

- Wybrane metody syntezy algorytmów sterowania, możliwych do zastosowania w systemach bezzałogowych.
- Kryteria wyboru algorytmów sterowania samolotem z punktu widzenia techniki pilotażu.
- Metodę wyboru algorytmów sterowania uwzględniającą właściwości wybranych elementów systemu bezzałogowego oraz człowieka, operatora samolotu bezzałogowego.

Rozdział czwarty jest, według mnie, najważniejszy dla przedstawionej rozprawy. Zawiera opis systemu bezzałogowego (RPAS) będącego przedmiotem badań. W jego skład wchodzi samolot OPV (Optional Piloted Vehicle) na bazie samolotu ultralekkiego MP-02 "czajka", stacja naziemna z systemem informatycznym oraz łącze transmisji danych.

W tym rozdziale przedstawiono dobór praw sterowania orientacją przestrzenną samolotu z wykorzystaniem wybranych przez Autora metod (klasyczny regulator PID, regulator krzepki, regulator rozmyty, regulator optymalny). Dokonano porównania jakości sterowania dla wymienionych wyżej przypadków. Przy czym Rozdział 4.3 jest sednem prac doktoranta. Prezentuje wyniki badań nad algorytmami sterowania wysokością i kursem samolotu w trzech konfiguracjach całego systemu. Rozdziały 4.4, 4.5, 4.6 przedstawiają zastosowane przez Autora metody weryfikacji otrzymanych wyników (badania symulacyjne, badania stanowiskowe oraz zasługujące na szczególną uwagę badania podczas prób w locie małego automatycznie sterowanego samolotu).

Swoje dokonania Autor podsumowuje w rozdziale piątym, prezentując swoje osiągnięcia, wnioski jakie wyciągnął z przeprowadzonych badań oraz wskazuje możliwe kierunki dalszych swoich badań.

### **3. Cel i zakres pracy**

Autor rozprawy bazując na danych literaturowych, wynikach swoich wcześniejszych prac, wynikach prac prowadzonych na Politechnice Rzeszowskiej i innych ośrodkach naukowych, w zakresie automatycznego sterowania samolotami, sformułował cel pracy:

"Synteza oraz ocena działania algorytmów sterowania samolotem z uwzględnieniem właściwości obiektu, elementów pomiarowych, wykonawczych, systemu transmisji danych i operatora"

Doktorant opracował a w pracy przedstawił swoją koncepcję układu sterowania samolotem w systemach RPAS. Założył, że w pokładowej części układu sterowania zostaną zaimplementowane jedynie podstawowe funkcje sterowania orientacją przestrzenną samolotu. Natomiast algorytmy automatycznego sterowania wysokością i kursem lotu, sterowaniem na trajektorii, wspomagające pilota operatora podczas sterowania ręcznego zostaną umieszczone w systemie stacji naziemnej. W takiej strukturze praw sterowania jedynie część podstawowych funkcji odpowiedzialnych za lot automatyczny jest realizowana na pokładzie samolotu. Wszystkie złożone algorytmy sterowania, optymalizacji przelotu i inne są realizowane w naziemnej części systemu RPAS. W efekcie sterowanie algorytmy automatycznego sterowania muszą uwzględniać właściwości obiektu, elementów pomiarowych, elementów wykonawczych, systemu transmisji danych, systemu przetwarzania danych w stacji naziemnej a w przypadku sterowania ręcznego również człowieka operatora. Dlatego według mnie cel pracy został całkowicie osiągnięty, co zostało opisane w rozdziałach trzecim, czwartym i piątym.

Należy zaznaczyć, że osiągnięcie głównego celu pracy wymagało wcześniejszej realizacji kilku celów częściowych takich jak:

- przygotowanie modeli elementów systemu RPAS,
- wybór metod syntezy,
- wybór metod porównania działania algorytmów.
- opracowanie zbioru doświadczeń, których celem była wiarygodna weryfikacja otrzymanych wyników
- opracowanie i wykonanie stanowisk badawczych - do badań symulacyjnych oraz samolotu doświadczalnego do badań w locie.

Jak już wcześniej wspomniałem tematyką przewodnią pracy jest sterowanie samolotami bezzałogowymi, a więc tematyka ściśle związana z lotnictwem. Jednak lektura pracy przekonuje, że opiniowana rozprawa jest pracą z pogranicza kilku obszarów tematycznych. A realizacja celu głównego wymagała od doktoranta zrozumienia zagadnień między innymi z lotnictwa, mechaniki, budowy i eksploatacji maszyn, informatyki, elektroniki, radiokomunikacji i innych.

#### **4. Przyjęta metodyka badań**

Zastosowana przez doktoranta metodyka badań jest typową dla prac związanych z projektowaniem i analizą lotniczych systemów sterowania. Obejmuje etapy modelowania właściwości dynamicznych obiektu sterowania oraz wybranych elementów całego systemu, syntezy praw sterowania i weryfikację otrzymanych wyników za pomocą badań symulacyjnych oraz badań w locie.

Zastosowana metodyka jest według mnie wystarczająca dla prawidłowego przeprowadzenia opisanych w pracy badań i pozwala na wykonanie wszystkich niezbędnych działań zmierzających do realizacji celu pracy i udowodnienia postawionej we wstępie tezy.

#### **5. Wyniki badań i analiza wyników**

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Damiana Kordosa dotyczy aktualnego obecnie w Europie tematu sterowania samolotami bezzałogowymi klasy MALE (**M**edium **A**ltitude **L**ong **E**ndurance - zasięg powyżej 200 km, pułap około 3000-9000 m). Do budowy takiego samolotu dla Europy przygotowuje się obecnie Europejska Agencja Obrony. Samolot OPV MP-02A "Czajka", wybrany jako obiekt badań należy do tej właśnie klasy samolotów.

Pod względem merytorycznym praca jest opracowana prawidłowo. Obejmuje szeroki zakres tematyki badawczej. Ma charakter interdyscyplinarny.

Opisane badania w dziedzinie sterowania samolotami bezzałogowymi mają charakter nowatorski i użyteczny. Do najważniejszych osiągnięć doktoranta zaliczam:

- Opracowanie modelu kompletnego systemu bezzałogowego obejmującego elementy stacji naziemnej, łącze transmisji, układy pomiarowe, wykonawcze, dynamikę obiektu latającego
- Opracowanie modelu matematycznego układu sterowania anteną kierunkową zamontowaną na pokładzie samolotu.
- Opracowanie struktury systemu sterowania samolotem, w którym część funkcji sterujących jest przeniesiona z autopilota pokładowego do modułu znajdującego się w stacji naziemnej
- Opracowanie algorytmów odpornych sterowania orientacją przestrzenną samolotu przeznaczonych dla części pokładowej systemu.
- Opracowanie algorytmów automatycznego sterowania samolotem, wykorzystujących sterowanie odporne, przeznaczonych dla części naziemnej systemu.
- Opracowanie algorytmów sterowania wspomagających ręczne
- Opracowanie wskaźnika pozwalającego na porównanie działania różnych algorytmów sterowania samolotem bezzałogowym.

R

Wyniki swoich rozważań teoretycznych Autor sprawdził w badaniach doświadczalnych. Opisane w pracy metody weryfikacji objęły trzy serie testów: symulacje typu software in the loop simulations, symulacje typu hardware in the loop simulations, badania w locie. Zwłaszcza ostatnia z wyżej wymienionych metod zasługuje na uznanie i jest cennym wkładem. Badania w locie, które są najbardziej surową i obiektywną metodą weryfikacji otrzymanych wyników badań lotniczych układów automatycznego sterowania, dostarczyły znakomitego materiału doświadczalnego, który może zostać wykorzystany w kolejnych pracach rozwojowych opracowanego przez Autora systemu sterowania.

Niestety próby w locie nie zostały przeprowadzone na obiekcie docelowym a jedynie na małym, automatycznie sterowanym samolocie. Wykorzystanie innego niż docelowy nośnika wymagało dedykowanego zestawu nastaw badanych regulatorów. W związku z tym, może to nasuwać podejrzenia, że wyniki prób w locie nie są wiarygodne. Z drugiej jednak strony tak przeprowadzony proces weryfikacji wyników wykazał, że opracowana struktura układu sterowania jest elastyczna i może być wykorzystana do sterowania samolotami różnych klas.

## 6. Uwagi krytyczne

Autor nie ustrzegł się kilku błędów i niedociągnięć. Do słabych stron pracy zaliczam:

- Według bagatelizowanie swoich dokonań, co w kilku przypadkach skutkuje niewystarczającą dokumentacją osiągnięć Autora
    - Opracował wskaźnik do porównania jakości działania algorytmów sterowania orientacją przestrzenną samolotu, niestety nie przedstawił jego szczegółowego opisu.
    - Opracował model matematyczny systemu sterowania anteną kierunkową zamontowaną na pokładzie samolotu, lecz jego opis w pracy jest lakoniczny.
  - W rozdziale czwartym Autor wybiera metody syntezy algorytmów sterowania orientacją przestrzenną samolotu a później również wysokością lotu oraz kursem. Jednak nie nigdzie nie podaje według jakiego kryterium dokonuje tego wyboru.
  - Skróconą formę prezentacji wyników przeprowadzonych badań.
    - Prezentując efekt działania algorytmów sterowania orientacją przestrzenną samolotu nie zamieścił przebiegów czasowych sygnałów sterujących.
    - W przypadku sterowania wysokością i kursem lotu brak jest zmian odpowiednio kątów pochylenia i przechylenia.
- Przez co analiza wyników przez czytelnika jest utrudniona.
- Drobne błędy redakcyjne:
    - str. 12 - (2.4) błędne oznaczenie wymuszenia.
    - str. 13-15 - rysunki 2.3, 2.4 w pętli sprzężenia pojawia się - oznaczenie "MW" sugerujące mechanizm wykonawczy.

K

- str. 33            -(3.2, 3.4) – w opisie układów automatyki „s” oznacza zwykle operator Laplace’a,
- str. 35            - rys. 3.5 - zbyt długi czas obserwacji - rysunek jest nieczytelny,
- str. 42            - bardzo zła jakość rysunku 3.14.
- str. 48            - opis rysunków 3.18 i 3.21 powinien być w języku polskim,
- str. 61            - wzory funkcji przejścia nie są opisane,
- str. 66            - rysunek 4.8, co było intencją Autora?
- str. 92, 107      - rozmiary rysunków powinny być takie same,
- str. 147          - rysunki są trudne do interpretacji.
- schematy układów symulowanych w programie Matlab są nieczytelne.

## **7. Wniosek końcowy**

Zawarte w mojej recenzji uwagi krytyczne nie wpływają na moja bardzo wysoką ogólną ocenę pracy. Recenzowana praca wyróżnia się pod względem zakresu przeprowadzonych prac badawczych oraz możliwości przyszłego zastosowania otrzymanych wyników

Przedstawiona praca świadczy o dobrym przygotowaniu merytorycznym Autora i stanowi podstawę do stwierdzenia, że Pan Damian Kordos ma właściwe przygotowanie do samodzielnego prowadzenia badań Naukowych

Przedstawiam Szanownej Radzie Naukowej Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej wniosek o dopuszczenie Pana mgr inż. Damiana Kordosa do publicznej obrony i przyjęcia w/w. pracy, jako podstawy do nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

Uważam, że praca doktorska mgr inż. Damiana Kordosa pt.: "Synteza algorytmów sterowania samolotem bezzałogowym" spełnia warunki określone w art. 13 ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z dnia 14.03.2003 r.).

Tomasz Rogacz