

dr hab. inż. Andrzej Żyluk, prof. ITWL
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
01-494 Warszawa
ul. Ks. Bolesława 6

Warszawa 07.02.2015 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Damiana Kordosa
p.t. "Synteza algorytmów sterowania samolotem bezzałogowym"
wykonanej
na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej
pod kierownictwem
prof. dr. hab. inż. Jana Gruszeckiego

1. Wprowadzenie

Analiza współczesnych trendów rozwojowych lotnictwa wskazuje na rosnące znaczenie samolotów bezzałogowych zwłaszcza w zastosowaniach militarnych. Główną przeszkodą do wdrażania bezzałogowych statków powietrznych (BSP) w obszarze zastosowań cywilnych jest zarówno brak kompleksowych uregulowań prawnych dotyczących wykorzystania przestrzeni powietrznej przez tego rodzaju samoloty, jak też bariera psychologiczna wynikająca z obawy dotyczącej niezawodności systemów umożliwiających autonomiczny lot BSP i związanego z nim ryzyka zagrożenia bezpieczeństwa w obszarach powietrznych i na ziemi.

Nowoczesne platformy bezzałogowe charakteryzują się w pełni cyfrowym sterowaniem, wiele z nich dysponuje możliwością autonomicznego startu i lądowania oraz zmianą celów i zadań podczas lotu. Są też budowane platformy bojowe, które są w istocie latającymi, mobilnymi robotami zwalczającymi przeciwnika na morzu, lądzie i w powietrzu.

Jednym z głównych aspektów bezpieczeństwa użycia systemów bezzałogowych są pokładowe układy sterowania bezzałogowym statkiem powietrznym. Zagadnienie to nie jest dotąd w pełni zbadane i w literaturze informacja dotyczące systemów sterowania BSP jest trudno dostępna.

Doktorant wyszedł naprzeciw tym wyzwaniom i podjął się w swojej rozprawie zadania polegającego na zamodelowaniu i przebadaniu systemów automatycznego sterowania samolotów bezzałogowych.

Wybór tematyki rozprawy jest ściśle powiązany z rozwojem współczesnej ogólnie pojętej techniki lotniczej.

2. Omówienie treści rozprawy

Praca, mająca charakter pracy eksperymentalnej, zawiera 164 stron i składa się z sześciu rozdziałów. Zawarto w niej 159 rysunków przedstawiających wyniki badań w postaci wykresów, schematów, tabel oraz wzorów. W treści pracy Autor zaprezentował 70 pozycji literaturowych, w tym 6 odnośników do stron internetowych.

Rozdział pierwszy stanowi wstęp wprowadzający do tematyki poruszanej w rozprawie, na podstawie której Autor formułuje cel i tezę pracy. W dalszej części rozdziału przedstawiony jest sposób realizacji celu pracy z uwzględnieniem zarówno testów stanowiskowych, jak i na obiekcie rzeczywistym. Algorytmy badane przez doktoranta, należące do czterech grup, będą porównywane ze sobą w oparciu o wybrane wskaźniki jakości.

W rozdziale drugim Autor przedstawia ogólną strukturę systemu sterowania oraz systemu informatycznego zarówno dla samolotu bezzałogowego, jak i dla stacji kontroli lotów. W rozdziale tym znajdują się rozważania na temat systemu transmisji danych umożliwiającego komunikację pomiędzy samolotem a stacją naziemną.

Rozdział trzeci opisuje wybrane metody syntezy algorytmów sterowania możliwych do zastosowania w systemach bezzałogowych. Rozdział ten zawiera również informacje dotycząca kryteriów wyboru algorytmów sterowania z punktu widzenia techniki pilotażu, jak i teorii systemów sterowania automatycznego. W dalszej części Autor przedstawia metodykę wyboru algorytmów sterowania uwzględniającą poszczególne elementy systemu bezzałogowego, tj.: właściwości obiektu sterowania, elementów pomiarowych i wykonawczych, systemu transmisji danych oraz właściwości operatora samolotu bezzałogowego.

Rozdział czwarty stanowi podstawową zawartość prac prowadzonych przez Autora. W pierwszej części rozdziału Autor przedstawia poszczególne elementy badanego systemu bezzałogowego, w którego skład wchodzi samolot bezzałogowy Czajka MP-02 oraz samochód terenowy Honker, pełniący rolę stacji naziemnej. W dalszej części rozdziału Autor opisuje dobór praw sterowania orientacją przestrzenną samolotu z wykorzystaniem czterech rodzajów algorytmów sterowania; począwszy od klasycznego, przez krzepki, rozmyty do optymalnego. Jako pierwszy został opisany regulator PID, gdzie Autor opracował skrypt w pakiecie Matlab/Simulink do automatycznego wyznaczania współczynników regulatora w oparciu o identyfikację obiektu metodą Åströma i Hågglunda. Kolejnymi algorytmami badanymi są: regulator ślizgowy, regulator rozmyty oraz LQR. Podrozdział sterowania orientacją przestrzenną zakończony jest zestawieniem

ujmującym badane algorytmy wraz z osiągniętymi wartościami poszczególnych wskaźników jakości. Zestawienie wykonane jest zarówno dla ruchu podłużnego, jak i boczego.

Podrozdział 4.3 opisuje dobór algorytmów przy sterowania wysokością i kursem samolotu. Przy syntezy algorytmów sterowania rozważono trzy przypadki: klasyczny, gdzie autopilot znajduje się na pokładzie samolotu, kolejny z uwzględnieniem systemu transmisji danych (gdzie główny moduł sterowania znajduje się w stacji naziemnej) oraz trzeci, jako rozszerzenie drugiego przypadku o operatora sterującego z poziomu stacji naziemnej. W podrozdziale tym autor rozpatrzył trzy wybrane algorytmy sterowania w oparciu o doświadczenia opisane w poprzednim rozdziale. Jako pierwszy algorytm rozpatrywany został regulator ślizgowy, gdzie Autor dokonał modyfikacji metody przez wprowadzenie zmiennego współczynnika wzmocnienia w otoczeniu małego uchybu. Kolejnymi badanymi algorytmami są regulator PID oraz regulator rozmyty. Podrozdział ten zakończony jest obszernym podsumowaniem, w którym znajdują się wyniki badań zestawione ze sobą dla różnych struktur układu sterowania.

W rozdziale tym znajduje się obszerny fragment, w którym autor przedstawia testy systemu na trzech poziomach. Pierwszy poziom polega na testowaniu algorytmów w trybie SIL. Dla potrzeb tych testów Autor zbudował stanowisko umożliwiające weryfikacje algorytmu z poziomu pakietu Matlab/Simulink, połączonego z oprogramowaniem X-Plane, wzbogaconym o model testowanego samolotu. Kolejnym poziomem są testy HIL, gdzie Autor testuje zarówno warstwę sprzętową, jak i algorytmy autopilota. Do tego celu zostało zbudowane kolejne stanowisko testowe. Ostatnim poziomem testowym były próby w locie, na obiekcie rzeczywistym przygotowanym przez doktoranta.

Zakończeniem merytorycznym rozprawy doktorskiej jest rozdział piąty, w którym Autor podsumowuje dokonania i proponuje możliwości rozszerzenia dalszych prac nad omawianą tematyką.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Na podstawie oceny przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej można stwierdzić, że podjęte w niej trudne i ciekawe zadanie naukowo-badawcze zostało przez Autora zrealizowane. Rozprawa zawiera oryginalne osiągnięcia poznawcze i praktyczne, a sam Autor wykazał się wysokimi kompetencjami w zakresie prowadzonych analiz teoretycznych i doświadczalnych.

Najbardziej wartościowe i oryginalne osiągnięcia przedstawionej do oceny dysertacji to:

1. Zbudowanie układu sterowania samolotem bezzałogowym z poziomu stacji naziemnej, w oparciu o łącze bezprzewodowe i uwzględnienie operatora w kanale sterowania.

2. Skonstruowanie ruchomej anteny kierunkowej, zabudowanej na pokładzie samolotu, co jest unikatowym rozwiązaniem umożliwiającym zwiększenie zasięgu działania systemu bezzałogowego.
3. Opracowanie własnego skryptu umożliwiającego automatyczny dobór współczynników regulatora PID. Przebadanie algorytmu sterowania reprezentującego cztery grupy: krzepkie, optymalne, rozmyte i klasyczne. Przeprowadzone badania uwzględniały różne struktury układu sterowania.
4. Opracowanie metodyki wyboru algorytmu sterowania uwzględniającego poszczególne elementy systemu bezzałogowego.
5. Przeprowadzenie wieloetapowych testów zarówno algorytmów, jaki i części sprzętowej autopilota w testach SIL i HIL, w celu minimalizacji wystąpienia uszkodzenia podczas prób w locie.
6. Interdyscyplinarność pracy – w dziedzinach takich jak mechanika, budowa i eksploatacja maszyn, elektronika, informatyka, transport.

Uzyskane wyniki z przeprowadzonych badań potwierdzają postawioną tezę o możliwości sterowania samolotem bezzałogowym, gdy obiekt sterowany jest z poziomu naziemnej stacji kontroli lotów.

Praca zawiera również elementy dyskusyjne, drobne nieścisłości lub niedopowiedzenia. Mimo starannej redakcji rozprawy Autor nie ustrzegł się błędów merytorycznych i redaktorskich. Podam je w kolejności ich występowania w tekście.

Uwagi szczegółowe:

- str. 7¹³ – błąd stylistyczny w zdaniu,
- str. 11⁵ – sformułowanie niepoprawne „Atmosfera nie wprowadza licznych zakłóceń”,
- str. 11 – w jakim układzie współrzędnych?,
- str. 11, (2.3) – u a nie v ,
- str. 12 - po przekształceniu jednostkowym Laplace'a,
- str. 13-14, rys. 2.1, 2.3, 2.3, 2.4 – brak oznaczeń na wyjściu bloków czujnika pomiarowego,
- str. 17, rys. 2.5 – schemat własny, czy zaczerpnięty z literatury?,
- str. 21¹¹ – brak definicji atrybutu,
- str. 21, rys. 2.8 - schemat własny, czy zaczerpnięty z literatury?,
- str. 26₄ – jakich dwóch elementów stacji to dotyczy?,
- str. 28² – co oznacza element odpowiednio dostosowany do obiektu?,
- str. 31, rys. 3.1 – skąd zaczerpnięto pożądany przebieg charakterystyk?,
- str. 33, (3.2, 3.4) – w systemach sterowania „s” jest operatorem Laplace'a,
- str. 40, rys. 3.13 – schemat układu sterowania według modelu jest zbyt uproszczony,
- str. 43, (3.12) – czy można tak zapisać?,
- str. 48 – opis rysunków 3.18 i 3.21 powinien być w języku polskim,
- str. 61 – zależności funkcji przejścia powinny być w pełnej postaci,
- str. 66 – brak oznaczenia bloku w pętli sprzężenia zwrotnego na rys. 4.9,

- str. 67₁₀ – co to jest bilans łącza radiowego?,
str. 77, rys. 4.20 i 4.21 – co to jest tryb pozycyjny?,
str. 83, rys. 4.26 – czy jest to projekt autorski?,
str. 97, rys 4.47 – niejasność na schemacie pomiędzy „s”, a „u”,
str. 97 – niejasność oznaczeń „sgn(s)”, „sing1”,
str. 121 – jaką metodę ekspertową Autor ma na myśli?,
str. 142, rys. 4.106 – jest to okno oprogramowania,
str. 147 – ostatnie zdanie zmieniłbym na „Rozbieżności zauważalne w układzie sterowania przez operatora wiążą się z czynnikiem ludzkim.”,
str. 151, rys. 4.117 – połączyłbym z rys. 4.118,
str. 155₈ – może autor miał na myśli orientację przestrzenną, a nie konfigurację lotu?,
str. 157₅ – błąd stylistyczny w zdaniu
- brak oznaczeń,
 - angielskojęzyczne skróty w spisie treści,
 - zła jakość rysunków np. 2.1÷2.14, 3.14.

Uwagi dyskusyjne:

- BSL czyli bezzałogowy system latający czy SBSP system bezzałogowych statków powietrznych?
- W jaki sposób można otrzymane wyniki zaimplementować na docelowym obiekcie?

Wymienione niedociągnięcia nie mają zasadniczego wpływu na wartość merytoryczną rozprawy, pozostałe drobne uwagi przekazałem Doktorantowi.

Uważam, że zakres wykonanych przez Autora analiz, jest wystarczający dla uzasadnienia postawionego celu pracy. Temat pracy odpowiada zawartej w niej treści.

Uwzględniając podstawowe elementy recenzowanej rozprawy doktorskiej oceniam rozprawę doktorską mgr. inż. Damiana Kordosa pozytywnie.

4. Wniosek końcowy

Podsumowując należy stwierdzić, że Doktorant mgr inż. Damian Kordos:

- zrealizował postawiony cel pracy oraz uzasadnił słuszność przyjętej tezy,
- zrealizował zadanie naukowo-badawcze zawierające oryginalne osiągnięcia poznawcze i praktyczne,
- uzyskał nowe elementy w pracy doktorskiej które mogą być wykorzystane do konstruowania systemów sterowania BSP,
- wykazał się wysokimi kompetencjami w zakresie prowadzonych analiz teoretycznych i doświadczalnych.

Przedstawiam Szanownej Radzie Naukowej Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej wniosek o dopuszczenie Pana mgr inż. Damiana Kordosa do publicznej obrony i przyjęcia ww. 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.).

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, cursive letters that appear to be 'ZKE'.