

dr hab. inż. Mirosław Gerigk, prof. nadzw. PG
Katedra Mechaniki i Mechatroniki
Wydział Mechaniczny
Politechniki Gdańskiej

Recenzja
pracy doktorskiej mgr inż. Marcina Chodnickiego
pt. "Modelownie dynamiki i procesu samonaprowadzania bezzałogowego wielowirnikowego
statku powietrznego na cele ruchome i nieruchome"

Podstawa prawna. Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie decyzji Rady Naukowej Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych z dnia 28.02.2019 r. o powołaniu recenzentów rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Chodnickiego pt.: "Modelownie dynamiki i procesu samonaprowadzania bezzałogowego wielowirnikowego statku powietrznego na cele ruchome i nieruchome" oraz w oparciu o pismo Pana prof. dr hab. inż. Józefa Żurka, Zastępcy Przewodniczącego Rady Naukowej Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych z dnia 24.04.2019 r.

1. Ocena uzasadnienia podjęcia tematu rozprawy

Problem badawczy, którego rozwiązania podjął się Pan mgr inż. Marcin Chodnicki dotyczy modelowania dynamiki i procesu samonaprowadzania bezzałogowego wielowirnikowego statku powietrznego (w dalszej części recenzji oznaczono jako BWSP) na cele ruchome i nieruchome jest bardzo aktualny z punktu widzenia:

- identyfikacji cech dynamicznych BWSP,
- symulacji pracy Układu Śledzenia Wizyjnego UŚW,
- pracy systemów sterowania i naprowadzania BWSP,
- stabilizacji, nawigacji i automatyki BWSP,

ale przede wszystkim z uwagi na dobór metod naprowadzania BWSP, w tym dobór najskuteczniejszej metody naprowadzania BWSP, zapewniającej bezpośrednie trafienie, w zależności od typu celu.

Istota pracy doktorskiej przedstawionej do oceny przez Doktoranta dotyczy modelowania dynamiki i procesu samonaprowadzania BWSP na cele ruchome i nieruchome i tak też została sformułowana teza pracy, że "możliwe jest skuteczne samonaprowadzanie BWSP na cele ruchome i nieruchome". W celu rozwiązania tak postawionego zadania badawczego Doktorant do modelowania dynamiki BWSP i procesu samonaprowadzania BWSP, zastosował zaawansowane metody i modele, w tym między innymi:

- model matematyczny BWSP,
- model matematyczny układu UŚW,
- model matematyczny obserwatora stanu,
- model (algorytm) sterowania BWSP z wykorzystaniem układu UŚW,
- opracowane w oparciu o literaturę, w tym własne, metody samonaprowadzania BWSP.

Z naukowo-badawczego punktu widzenia, modelownie dynamiki i procesu samonaprowadzania BWSP na cele ruchome i nieruchome można przeprowadzić stosując badania na obiekcie rzeczywistym BWSP, na modelu fizycznym BWSP lub podczas analizy numerycznej przy użyciu symulacji komputerowej. Stosując dwie ostatnie metody, modelownie dynamiki i procesu samonaprowadzania BWSP, można przeprowadzić w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. W przypadku badań na modelu fizycznym konieczne jest dodatkowo ekstrapolowanie otrzymanych wyników na obiekt rzeczywisty.

Badania numeryczne przy użyciu symulacji komputerowej, które zastosował Doktorant rozwiązując problem badawczy, modelowania dynamiki i procesu samonaprowadzania BWSP na cele ruchome i nieruchome, można przeprowadzić wykorzystując dwa podejścia. Pierwsze, związane jest z zastosowaniem modeli analitycznych, gdy znana jest funkcja umożliwiająca wyznaczenie jej wartości,

dla założonych parametrów i zakresu zmiennych, w sposób bezpośredni. Drugie podejście wymaga zastosowania odpowiednich modeli numerycznych (metoda, metody numeryczne, analiza błędów). W przypadku przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej mamy do czynienia z poszukiwaniem rozwiązania przy użyciu modeli analitycznych i numerycznych (symulacja, symulacja komputerowa).

W czasie badań własnych Doktorant przyjął, jako przedmiot badań obiekt BWSP, który może być potencjalnie eksploatowany w warunkach operacyjnych w Siłach Zbrojnych RP, i który może stanowić część systemu wojskowego wykonującego zadania obserwacyjno-rozpoznawcze lub typowo bojowe. Badania na obiekcie rzeczywistym lub zbliżonym do rzeczywistego charakteryzują się tym, że są pracochłonne i kosztowne. Zaletą tych badań jest natomiast realność sytuacji i uzyskanie wyników dotyczących obiektu rzeczywistego.

W celu rozwiązania zadania badawczego Doktorant zastosował aktualne metody badawcze, co potwierdza przyjęty plan pracy.

Należy podkreślić, że Doktorant przedstawił do recenzji pracę, która dotyczy aktualnych problemów zarówno naukowych-badawczych jak i eksploatacyjnych (operacyjnych), których rozwiązanie ma bardzo duże znaczenie praktyczne.

2. Ogólna ocena rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Chodnickiego liczy łącznie 221 stron. Obejmuje część merytoryczną, składającą się z 8 rozdziałów wraz z podsumowaniem. Do pracy dołączono spis treści, wykaz skrótów i oznaczeń, streszczenie oraz "Wstęp", które poprzedzają część merytoryczną pracy zawartą w rozdziałach od 1 do 7. Za integralną część rozdziałów stanowiących część merytoryczną pracy należy uznać "Podsumowanie". Po podsumowaniu na końcu pracy załączono Załącznik nr 1, spis rysunków, wykaz tabel i literaturę. Spis literatury zawiera łącznie 46 pozycji, w tym 12 pozycji to publikacje internetowe. Merytoryczna część rozprawy doktorskiej została podzielona na 7 rozdziałów. Przed Rozdziałem 1 umieszczono "Wstęp".

We "Wstępie" Doktorant najpierw zdefiniował bezzałogowe wielowirnikowe statki powietrzne BWSP. Następnie, w sposób syntetyczny opisał tendencje związane z rozwojem technologii bezzałogowych statków powietrznych. Sformułował założenia do pracy, po czym przedstawił tezę rozprawy w sposób następujący: "Możliwe jest skuteczne samonaprowadzanie BWSP na cele ruchome i nieruchome". Potem Autor przedstawił cel pracy wraz z podaniem celów szczegółowych. Autor podał, że jako główny element pracy **opracowano dokładny i wiarygodny model symulacyjny, wykorzystany do zdefiniowania obserwatora stanu, algorytmów sterowania oraz metod naprowadzania BWSP**. W końcowej części "Wstępu" przedstawiono strukturę pracy.

W rozdziale 1 "Identyfikacja cech dynamicznych BWSP", Doktorant przedstawił opis matematyczny ruchu bezzałogowego wielowirnikowego statku powietrznego BWSP i analizę jego dynamiki (zachowania się). Opisał kolejno budowę BWSP (podrozdział 1.1). Następnie, model matematyczny BWSP (podrozdział 1.2), w którym opisano równania ruchu (1.2.1) oraz analizę dynamiki ruchu BWSP (1.2.2). Potem dokonano podziału BWSP w wersji obserwacyjnej z jego odpowiednikiem w wersji uderzeniowej (podrozdział 1.3), gdzie przedstawiono zagadnienie wyznaczania momentów bezwładności (1.3.1) oraz modyfikacji momentów sterujących (1.3.2).

W rozdziale 2 "Analiza systemów sterowania i kierowania obiektów latających", Autor opisał metody naprowadzania rakiet. Najpierw przedstawił systemy kierowania rakiet (podrozdział 2.1). Następnie dokonał klasyfikacji metod naprowadzania (podrozdział 2.2), gdzie opisał kolejno metodę pogoni bez kąta wyprzedzenia (2.2.1), metodę pogoni ze stałym kątem wyprzedzenia (2.2.2), metodę równoległego zbliżania (2.2.3), metodę proporcjonalnej nawigacji (2.2.4), metodę naprowadzania bezpośredniego (2.2.5), zmodyfikowaną metodę proporcjonalnej nawigacji (2.2.6).

W rozdziale 3 "Ocena wpływu cech lotnych BWSP na możliwość zastosowania różnych metod samonaprowadzania", Autor przedstawił analizę cech lotnych BWSP w kontekście możliwości wykorzystania praw sterowania pociskami rakiętowymi (z urządzeniami pokładowymi) w rozważanych zastosowaniach. Najpierw przedstawił własności lotne BWSP (podrozdział 3.1). Potem Autor przeprowadził analizę możliwości zastosowania różnych metod naprowadzania (podrozdział 3.2). Następnie przedstawił podsumowanie przeprowadzonej analizy (podrozdział 3.3), z której wynika, że wszystkie omówione w pracy metody naprowadzania mogą zostać użyte do

naprowadzania BWSP na cele. Jednak metodę naprowadzania należy dobrać w zależności od typu celu. Z powyższego powodu, w procesie automatyzacji całego systemu BWSP, układ UŚW powinien być wyposażony w klasyfikator celów, który je identyfikuje i umożliwia wybranie najskuteczniejszej metody naprowadzania.

W rozdziale 4 "Identyfikacja parametrów zespołów napędowych BWSP" Doktorant poświęcił dużo uwagi na identyfikację parametrów zespołu napędowego, gdyż za dynamikę BWSP w głównej mierze odpowiada układ napędowy. Omówiono najpierw zagadnienie dotyczące siły ciągu (podrozdział 4.1), następnie prędkości obrotowej (podrozdział 4.2), potem prędkości indukowanej (podrozdział 4.3), z kolei momentu oporowego (podrozdział 4.4) i na końcu zagadnienie związane z natężeniem prądu (podrozdział 4.5).

W rozdziale 5 "Model symulacyjny BWSP" Autor przedstawił kluczowy element pracy, związany z opracowaniem modelu symulacyjnego BWSP. Model ten składa się modelu matematycznego BWSP, modelu (otoczenia) atmosfery, wiatru i turbulencji oraz symulacji czujników pokładowych. Opisano najpierw standard "International Standard Atmosphere" (ISA) dotyczący pionowego rozkładu ciśnienia, temperatury, gęstości powietrza i prędkości dźwięku (podrozdział 5.1); następnie opisano model Drydena dotyczący opisu matematycznego wiatru i jego turbulencji (podrozdział 5.2); z kolei przedstawiono opis matematyczny układu śledzenia wizyjnego (podrozdział 5.3); potem opisano czujniki inercyjne i nawigacyjne (podrozdział 5.4), w tym żyroskop (5.4.1), akcelerometr (5.4.2), magnetometr (5.4.3), czujnik ciśnienia statycznego - barometr (5.4.4), moduł GPS (5.4.5), czujnik odległości - LIDAR (5.4.6) i na koniec przedstawiono podsumowanie (5.4.7). Badania umożliwiły wyznaczenie parametrów wymienionych sensorów, określenie ich odchylenia standardowego, które zostało wykorzystane do zamodelowania danego czujnika i danych wejściowych dla obserwatora stanu. Wyniki pokazały konieczność przeprowadzenia dodatkowych badań.

W rozdziale 6 "System stabilizacji i sterowania lotem BWSP", Doktorant przedstawił algorytmy stabilizacji i sterowania, z uwagi na fakt, że BWSP uznano za obiekt niestateczny. Omówiono kolejno następujące zagadnienia. Najpierw syntezę systemów sterowania (podrozdział 6.1). Następnie, filtrację sygnałów z czujników pokładowych (podrozdział 6.2). Potem, opisano obserwatora stanu - Rozszerzony Filtr Kalmana (EKF) (podrozdział 6.3), w tym opis matematyczny EKF (6.3.1), model stanów (6.3.2), macierz kowariancji (6.3.3), fuzję z magnetometrem (6.3.4), fuzję z barometrem i czujnikiem odległości LIDAR (6.3.5), fuzję z GPS (6.3.6), algorytm fuzji danych z czujników o różnym opóźnieniu (6.3.7), wyniki estymacji stanów obiektu (6.3.8) oraz podsumowanie (6.3.9). Opracowane algorytmy pozwalają na wyznaczenie stanów obiektu w danej chwili czasu, bazując na danych pochodzących z czujników pokładowych o różnym odchyleniu standardowym oraz opóźnieniu. Z kolei opisano zagadnienie stabilizacji prędkości i orientacji kątowej (podrozdział 6.4). Potem opisano zagadnienie sterowania położeniem i prędkością postępową (podrozdział 6.5), w tym sterowanie wzdłuż osi Oz (6.5.1), sterowanie wzdłuż osi Ox i Oy (6.5.2). Następnie przedstawiono algorytmy sterowania z wykorzystaniem układu UŚW (podrozdział 6.6), w tym zagadnienie sterowania w odpowiedzi na uchyb kąta odchylenia osi BWSP od LOC (linii obserwacji celu) (6.6.1), zagadnienie sterowania w odpowiedzi na uchyb kąta odchylenia wektora prędkości od LOC.

W rozdziale 7 "Ocena skuteczności opracowanych metod samonaprowadzania BWSP", Autor przedstawił analizę i ocenę skuteczności opracowanych metod naprowadzania BWSP na cele ruchome i nieruchome. Ocenie podano piętnaście (15) metod naprowadzania wymienionych na stronie 117/118. Następnie omówiono kolejno następujące metody: Metodę naprowadzania bezpośredniego bez kąta wyprzedzenia (podrozdział 7.1), Metodę naprowadzania bezpośredniego ze stałym kątem wyprzedzenia (podrozdział 7.2), Zmodyfikowaną metodę naprowadzania bezpośredniego z kątem wyprzedzenia i bez kąta wyprzedzenia (podrozdział 7.3), Metodę równoległego zbliżania (podrozdział 7.4), Metodę pogoni bez kąta wyprzedzenia (podrozdział 7.5), Metodę proporcjonalnej nawigacji (podrozdział 7.6), Zmodyfikowaną metodę proporcjonalnej nawigacji (podrozdział 7.7), Metodę proporcjonalnej nawigacji z wyznaczonym kątem wyprzedzenia (podrozdział 7.8), Metodę nawigacji z proporcjonalnym przyrostem (podrozdział 7.9).

Następnie, dokonano oceny metod naprowadzania do celów statycznych naziemnych (podrozdział 7.10), w tym: metody naprowadzania bezpośredniego bez kąta wyprzedzenia (7.10.1), metody naprowadzania bezpośredniego ze stałym kątem wyprzedzenia (7.10.2), zmodyfikowanej metody naprowadzania bezpośredniego bez kąta i z kątem wyprzedzenia (7.10.3), metodę

równoległego zbliżania (7.10.4), metodę pogoni bez kąta wyprzedzenia (7.10.5), metodę pogoni ze stałym kątem wyprzedzenia (7.10.6), metodę proporcjonalnej nawigacji (7.10.7) - bez kąta wyprzedzenia i z kątem wyprzedzenia, metodę nawigacji z proporcjonalnym przyrostem (7.10.8), porównanie metod naprowadzania na cele statyczne naziemne (7.10.9), analizę wpływu zakłóceń zewnętrznych (7.10.10).

Z kolei, dokonano oceny metod naprowadzania do celów statycznych powietrznych (podrozdział 7.11).

Następnie, przeprowadzono ocenę metod naprowadzania do celów ruchomych naziemnych, w tym: w przypadku celu naziemnego niemanewrującego (7.12.1), w przypadku celu naziemnego manewrującego (7.12.2).

Potem, dokonano oceny metod naprowadzania do celów ruchomych powietrznych, w tym: w przypadku celu powietrznego niemanewrującego (7.13.1), w przypadku celu powietrznego manewrującego (7.13.2).

W rozdziale "Podsumowanie" (str. 195), Doktorant przedstawił bardzo interesujące wnioski wynikające z przeprowadzonych przez siebie badań. Autor podkreślił, że został osiągnięty cel zasadniczy badań jakim było opracowanie algorytmów stabilizacji, sterowania i skutecznej metody samonaprowadzania bezzałogowych statków BWSP na cele ruchome i nieruchome. Badania umożliwiły potwierdzenie przyjętej tezy.

Autor podkreślił, że identyfikacja cech dynamicznych oraz parametrów zespołów napędowych bezzałogowych statków BWSP oraz opis matematyczny atmosfery, wiatru i turbulencji oraz Układu Śledzenia Wizyjnego (UŚW) umożliwiły opracowanie wiarygodnego modelu symulacyjnego, który został zastosowany w środowisku oprogramowania narzędziowego Matlab/Simulink. Autor zaznaczył, że przeprowadzono badania sensorów pokładowych, wyniki których zostały uwzględnione w badaniach rozszerzonego filtra Kalmana oraz w algorytmie fuzji danych otrzymanych z czujników o różnym opóźnieniu. Przeprowadzono też weryfikację działania algorytmu wyznaczania stanów obiektu z wykorzystaniem modelu symulacyjnego. Wyniki badań czujników przyspieszeń, podczas pracy układu napędowego, wykazały konieczność zastosowania filtracji cyfrowej sygnałów.

Autor podkreślił, że wyniku przeprowadzonej analizy dynamiki bezzałogowego statku BWSP, która wykazała, że statki tego typu są niestateczne, zdecydowano się na opracowanie algorytmów stabilizacji i sterowania BWSP. Algorytmy te umożliwiają sterowanie orientacją przestrzenną, prędkością oraz położeniem BWSP w układzie inercyjnym. W celu przeprowadzenia analizy możliwości naprowadzania BWSP na cele nieruchome i ruchome opracowano pętle sterowania, umożliwiające wyznaczenie sygnałów sterujących na podstawie danych pochodzących z układu UŚW.

Zasadniczą część pracy stanowi rozdział 7, w którym przedstawiono wyniki badań potwierdzające postawioną tezę. W rozdziale tym przeprowadzono ocenę skuteczności 15 różnych metod naprowadzania BWSP. Na uwagę zasługuje fakt, że większość tych metod to opracowania lub modyfikacje autorskie Doktoranta opracowane na podstawie metod naprowadzania rakiet, znanych w literaturze. Badania przeprowadzono dla wielu wariantów parametrów celu. Określono między innymi wpływ kąta wyprzedzenia i wartości stałej nawigacyjnej na charakterystyki występujące w odpowiednich metodach. Opracowane algorytmy sterowania wraz z zastosowanymi metodami naprowadzania zostały poddane analizie wpływu zakłóceń zewnętrznych, w postaci wiatru o stałej prędkości i wiatru turbulentnego (wg. modelu Drydena), na skuteczność ataku na cele. Otrzymane wyniki potwierdziły, że wspomniane zakłócenia nie wpływają negatywnie na skuteczność naprowadzania.

W czasie badań potwierdzono, że z uwagi na różnice w dynamice pomiędzy rakieta a BWSP, uzyskane trajektorie ruchu BWSP są inne niż w przypadku rakiety, szczególnie w płaszczyźnie pionowej. Inna jest też skuteczność testowanych metod naprowadzania.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

1) naprowadzanie na cele naziemne nieruchome:

- **bez informacji o położeniu wektora prędkości** powinno być realizowane w oparciu o "Zmodyfikowaną metodę naprowadzania bezpośredniego ze stałym kątem wyprzedzenia", **która jest rozwiązaniem autorskim Doktoranta,**

- **z informacją o położeniu wektora prędkości** powinno być realizowane w oparciu o "Metodę pogoni ze stałym kątem wyprzedzenia",

2) naprowadzanie na cele powietrzne nieruchome:

- **bez informacji o położeniu wektora prędkości** powinno być realizowane w oparciu o "Metodę naprowadzania bezpośredniego ze stałym kątem wyprzedzenia",
- **z informacją o położeniu wektora prędkości** powinno być realizowane w oparciu o "Metodę pogoni bez kąta wyprzedzenia",

3) naprowadzanie na cele naziemne ruchome:

- **bez informacji o położeniu wektora prędkości** powinno być realizowane w oparciu o "Metodę naprowadzania bezpośredniego ze stałym kątem wyprzedzenia",
- **z informacją o położeniu wektora prędkości** może być realizowane w oparciu o dowolną odmianę metody proporcjonalnej nawigacji; do naprowadzania na cele nie manewrujące optymalne jest wykorzystanie "Zmodyfikowanej metody proporcjonalnej nawigacji z wyznaczonym kątem wyprzedzenia", która gwarantuje najwyższą precyzję rażenia przy zachowaniu krótkiego czasu dolotu do celu; w przypadku celów manewrujących zaleca się stosować "Metodę proporcjonalnej nawigacji",

4) naprowadzanie na cele powietrzne ruchome:

- **bez informacji o położeniu wektora prędkości** powinno być realizowane w oparciu o "Metodę naprowadzania bezpośredniego ze stałym kątem wyprzedzenia" albo "Zmodyfikowaną metodę naprowadzania bezpośredniego ze stałym kątem wyprzedzenia",
- **z informacją o położeniu wektora prędkości** może być realizowane w oparciu o dowolną odmianę metody proporcjonalnej nawigacji; najlepsze wyniki daje "Zmodyfikowana metoda nawigacji z proporcjonalnym przyrostem, z wyznaczonym kątem wyprzedzenia, która jest rozwiązaniem autorskim Doktoranta.

Badania przeprowadzone przez Autora w oparciu o powyższą analizę wykazały, że wybór metody naprowadzania powinien być dokonany w oparciu o typ celu, na który ma być naprowadzany BWSP. Istnieje potrzeba opracowania klasyfikatora obiektów, jako integralna część układu UŚW. Takie rozwiązanie umożliwiłoby automatyczny wybór metody naprowadzania i optymalizację skuteczności pracy całego systemu w warunkach operacyjnych.

Zdaniem Doktoranta, niezależnie od typu celu "Metoda naprowadzania bezpośredniego ze stałym kątem wyprzedzenia" pozwala na skuteczne rażenie celów bez informacji o położeniu wektora prędkości. W przypadku, gdy informacja o położeniu wektora prędkości jest dostępna można wykorzystać większość rozwiązań bazujących na metodzie proporcjonalnej nawigacji z wykluczeniem "Metody proporcjonalnej nawigacji z wyznaczonym kątem wyprzedzenia" oraz "Zmodyfikowanej metody proporcjonalnej nawigacji z wyznaczonym kątem wyprzedzenia".

W końcowej części rozdziału Autor zawarł informacje o stanie badań na etapie zakończenia niniejszej dysertacji. Autor określił też cel dalszych badań, gdzie wyniki badań symulacyjnych skuteczności metod naprowadzania zostaną poddane weryfikacji podczas badań w locie.

Recenzowana rozprawa doktorska posiada odpowiednią dla prac dysertacyjnych strukturę logiczną i formalną. Rozprawa zawiera kolejno:

- 1) syntetyczne wprowadzenie do obszaru tematyki pracy,
- 2) motywację podjęcia tematyki badań wraz z tezą pracy,
- 3) sformułowanie zadania naukowego wraz z podaniem problemu badawczego, w tym przedstawienie zasadniczego celu badań i celów szczegółowych,
- 4) szczegółowy opis sposobu rozwiązania postawionego zadania, w tym w zakresie:
 - identyfikacji cech dynamicznych bezzałogowego statku BWSP,
 - analizy systemów sterowania i kierowania obiektów BWSP,
 - oceny wpływu cech lotnych BWSP na możliwość zastosowania różnych metod samonaprowadzania,
 - identyfikacji parametrów zespołów napędowych BWSP,
 - modelu symulacyjnego BWSP,
 - systemu stabilizacji i sterowania lotem BWSP,
 - oceny skuteczności opracowanych metod samonaprowadzania BWSP,
- 5) wyniki badań własnych i ich weryfikację,
- 6) podsumowanie i wnioski.

Doktorant wykorzystał zbiór publikacji obejmujący 46 pozycji. Zdecydowana większość pozycji literatury, 30 pozycji, pochodzi z okresu po roku 2010. Duża część, 13 pozycji, była wydana w latach 2000-2010.

3. Uwagi krytyczne dotyczące rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska pod względem redakcyjnym została wykonana bardzo staranie. Praca posiada dużo zalet, jako przykłady można wymienić to, że:

- 1) Po zdefiniowaniu bezzałogowego wielowirnikowego statku powietrznego (BWSP), syntetycznej analizie technologii związanych z rozwojem bezzałogowych pojazdów powietrznych oraz przyjęciu założeń, Autor sformułował tezę pracy oraz jej cel wraz z podaniem celów szczegółowych.
- 2) Praca zawiera między innymi spis podstawowych skrótów, Załącznik nr 1 - elementy macierzy Jakobiana stanów (str. 199) oraz szczegółowy spis rysunków (str. 205) i wykaz tabel (str. 215).

Jeśli chodzi o uwagi krytyczne, o charakterze ogólnym, dotyczące rozprawy doktorskiej, należy podkreślić co następuje:

- 1) Niewielkim mankamentem pracy, z uwagi na jej specyfikę, jest to, że nie zawiera ona spisu podstawowych oznaczeń, choć nazwa akapitu na to wskazuje (str. 7); natomiast wykazy oznaczeń zawarte w poszczególnych rozdziałach i podrozdziałach należy uznać za dokładne i w pełni wystarczające do analizy poszczególnych zagadnień..
- 2) Ponieważ praca dotyczy problematyki nowej, związanej z modelowaniem dynamiki i procesu samonaprowadzania bezzałogowego wielowirnikowego statku powietrznego BWSP (na cele nieruchome i ruchome), zaletą pracy byłoby umieszczenie rozdziału "Terminologia", ukierunkowanego na przedstawienie krótkich podstawowych definicji cech BWSP, systemów sterowania i metod naprowadzania BWSP.

W pracy występują nieliczne błędy stylistyczne i edytorskie. Recenzent uznał, że te błędy nie wpływają znacząco na jakość pracy.

Recenzent pragnie zaznaczyć, że powyższe uwagi nie pomniejszają w żadnym stopniu wartości merytorycznej rozprawy doktorskiej, którą recenzent ocenia bardzo wysoko zarówno z merytorycznego, stylistycznego jak i edytorskiego punktu widzenia.

4. Ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej z uwagi na wkład własny Doktoranta

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Chodnickiego dotyczy "*Modelownia dynamiki i procesu samonaprowadzania bezzałogowego wielowirnikowego statku powietrznego na cele ruchome i nieruchome*".

Przedstawione w rozprawie doktorskiej zagadnienia związane z modelowaniem dynamiki i procesu samonaprowadzania bezzałogowego wielowirnikowego statku powietrznego BWSP na cele ruchome i nieruchome, zostały oparte na współczesnej wiedzy w zakresie identyfikacji cech dynamicznych bezzałogowych wielowirnikowych statków powietrznych BWSP, analizy systemów sterowania i kierowania obiektami latającymi, oceny wpływu cech lotnych na możliwość zastosowania różnych metod samonaprowadzania, identyfikacji parametrów zespołów napędowych, modelu symulacyjnego, systemu stabilizacji i sterowania lotem oraz oceny skuteczności opracowanych metod samonaprowadzania BWSP.

Zawarta w rozprawie wiedza ma istotne znaczenie dla rozwoju poszczególnych technologii decydujących o zastosowaniu bezzałogowych wielowirnikowych statków powietrznych BWSP, ale przede wszystkim dla zastosowania bezzałogowych statków powietrznych BWSP w warunkach operacyjnych, jako istotny element zdolności operacyjnych Sił Zbrojnych RP.

Ogólnie, Doktorant rozwiązał następujące problemy badawcze:

- 1) opracował dokładny i wiarygodny model symulacyjny, który został wykorzystany do zdefiniowania obserwatora stanu, algorytmów sterowania oraz metod naprowadzania BWSP,
- 2) wykonał szereg badań laboratoryjnych w celu wyznaczenia charakterystyk zespołu napędowego i właściwości czujników pokładowych.

Na wyróżnienie zasługuje fakt, że Doktorant opracował własną metodykę badań obejmującą następujące elementy:

- opracowanie modelu do identyfikacji cech dynamicznych bezzałogowego statku powietrznego BWSP,

- analiza możliwości zastosowania istniejących metod naprowadzania,
- opracowanie modelu symulacyjnego BWSP,
- opracowanie algorytmu sterowania BWSP z wykorzystaniem układu UŚW,
- analiza metod naprowadzania możliwych do zastosowania z wykorzystaniem BWSP,
- ocena zastosowania metod naprowadzania do celów statycznych naziemnych, celów statycznych powietrznych, celów ruchomych naziemnych i celów ruchomych powietrznych.

Autor dokonał oceny wykonanych przez siebie badań symulacyjnych oraz określił cel dalszych badań, gdzie wyniki badań symulacyjnych skuteczności metod naprowadzania zostaną poddane weryfikacji podczas badań w locie.

W dysertacji przedstawiono metodykę modelowania dynamiki i procesu samonaprowadzania bezzałogowego wielowirnikowego statku powietrznego na cele ruchome i nieruchome oraz opracowano własne metody i modele umożliwiające samonaprowadzanie bezzałogowego wielowirnikowego statku powietrznego BWSP. Przeprowadzono kompletne badania symulacyjne.

Należy podkreślić, że przeprowadzone przez Doktoranta badania zostały przeprowadzone w oparciu o dane związane z eksploatacją obiektów w warunkach przybliżonych do operacyjnych, stanowiących część systemu wojskowego wykonującego zadania bojowe. Wszystkie opracowane algorytmy będą implementowane na obiektach rzeczywistych, które mogą być wykorzystane przez Siły Zbrojne RP.

Pan mgr inż. Marcin Chodnicki posiada dużą wiedzę w zakresie podstaw teoretycznych i identyfikacji cech dynamicznych BWSP, analizy systemów sterowania i kierowania obiektami latającymi, analizy wpływu cech lotnych BWSP na możliwość zastosowania różnych metod samonaprowadzania, modelu symulacyjnego BWSP, systemów stabilizacji i sterowania lotem BWSP oraz analizy, w tym oceny, skuteczności opracowanych metod samonaprowadzania BWSP. Na szczególne wyróżnienie zasługują umiejętności Doktoranta w zakresie metod naprowadzania BWSP do celów statycznych naziemnych, celów statycznych powietrznych, celów ruchomych naziemnych i celów ruchomych powietrznych.

Wartość naukowa i praktyczna przedstawionej do recenzji pracy jest bardzo duża. Praca doktorska mgr inż. Marcina Chodnickiego wnosi istotny wkład do dziedziny związanej z eksploatacją obiektów technicznych, z ukierunkowaniem na bezzałogowe wielowirnikowe statki powietrzne BWSP.

Należy podkreślić, że metodę opracowaną przez Doktoranta można zastosować przede wszystkim w czasie eksploatacji przedmiotowych BWSP w warunkach operacyjnych. Dalsze udoskonalenie opracowanej przez Doktoranta metodyki i modeli może przyczynić się do znacznego zwiększenia gotowości operacyjnej i bezpieczeństwa obiektów BWSP w Siłach Zbrojnych RP.

5. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne i prawidłowe rozwiązanie postawionego zadania naukowego, mieszczącego się w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Chodnickiego *"Modelownie dynamiki i procesu samonaprowadzania bezzałogowego wielowirnikowego statku powietrznego na cele ruchome i nieruchome"*, całkowicie spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zawarte w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki (Dz. U. z 2016 r.).

W związku z powyższym, wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Chodnickiego do jej publicznej obrony.

Recenzent chciałby pokreślić, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi duże osobiste osiągnięcie Doktoranta, który rozwiązał trudny problem badawczy. Przystosował istniejącą wiedzę do rozwiązania trudnego problemu, jakim jest niewątpliwie modelownie dynamiki i procesu samonaprowadzania bezzałogowego wielowirnikowego statku powietrznego na cele ruchome i nieruchome. Przedstawił w sposób jasny i syntetyczny zagadnienie, które ma bardzo duże znaczenie dla eksploatacji obiektów BWSP w warunkach operacyjnych w Siłach Zbrojnych RP. Jednocześnie wnioskuję o wyróżnienie pracy, dołączając wniosek na piśmie.


27.04.2019r.