

dr hab. inż. Krzysztof Falkowski, prof. WAT
Wojskowa Akademia Techniczna

Warszawa, dn. 10.12.2022r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Patryka Szywalskiego
„Sterowanie zdecentralizowaną siecią bezzałogowych jednostek latających”

Niniejszą recenzję opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika prof. dr hab. inż. Dariusza ZMARZŁY – pismo nr REOOSTOO-19/D/2022 z dnia 25.10.2022 r.

1. Ogólna, formalna charakterystyka pracy

Recenzowana rozprawa została przedstawiona na 178 stronach maszynopisu i zawiera dziesięć rozdziałów, spis treści, wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń, streszczenie w języku polskim i angielskim, wnioski i uwagi oraz wykaz literatury. Wnioski i uwagi oraz wykaz literatury zostały umieszczone w spisie treści jako rozdział jedenasty i dwunasty.

Autor rozprawy, we wstępie, dokonał obszernego przedstawienia problematyki konstruowania bezzałogowych systemów powietrznych, które posiadają cechy układów autonomicznych. W kolejnych podrozdziałach precyzyjnie zdefiniował zagadnienia z obszaru nawigacji i sterowania oraz budowy bezzałogowych statków powietrznych (BSP) w konfiguracji czterowirnikowych platform latających. Ponadto zdefiniował podstawowe pojęcia wykorzystywane w dalszej części pracy i przedstawił klasyfikację poziomów autonomii BSP.

W drugim rozdziale omówiony został zakres i cel dysertacji. Jako cel pracy Autor zaproponował wykonanie bezzałogowego systemu latającego składającego się z pięciu bezzałogowych statków powietrznych i odpowiedniej infrastruktury naziemnej. Na podstawie

wstępnej oceny Pan Patryk Szywalski sformułował tezę „Możliwe jest zdecentralizowane sterowanie bezzałogowego systemu latającego z wykorzystaniem algorytmów deterministycznych”. Praca jako całość podzielona została na trzy części. Pierwsza część obejmuje konstrukcję bezzałogowej jednostki latającej. W tej części przedstawiona została konstrukcja BSP (Autor używa określenia urządzenie latające). Doktorant szczegółowo omówił konstrukcję ramy wielowirnikowej platformy latającej (BSP) i przeprowadził analizę wytrzymałościową ramy wykonanej z różnych materiałów. Autor opracował dwa BSP, pierwszy klasy 130 był przeznaczony głównie do wykonywania wstępnych testów i drugi klasy 300 był przeznaczony do wykonywania lotów w pomieszczeniu. BSP klasy 130 wykorzystywany został do testowania wyposażenia podczas lotów na otwartej przestrzeni. Szczegóły konstrukcji BSP przedstawione zostały w rozdziale trzecim. W rozdziale tym wyczerpująco omówione zostały wszystkie elementy systemu awionicznego, takie jak kontroler lotu, układy nawigacyjne, czujniki oraz dodatkowe sterowniki i przedstawiona została rola poszczególnych elementów w systemie.

Kolejny rozdział dotyczy problematyki wymiany danych w sieci radiowej. Autor założył, że opracowany system zostanie zdecentralizowany, czyli każde z urządzeń latających komunikuje się z pozostałymi. W rozdziale przedstawiono protokoły komunikacyjne oraz pracę BSP w sieci radiowej opracowanej przez Doktoranta.

W rozdziale piątym omówiony został algorytm sterowania BSP. Autor szczegółowo omówił generowanie trajektorii ruchu BSP oraz elementy odpowiedzialne za sterowanie BSP. Podstawowe trajektorie opisane przez Doktoranta to odcinek prosty, wycinek koła i helisa (spirala). Z takich elementów komponowana jest trajektoria ruchu pojedynczego BSP. Ostatnim elementem tej części pracy są badania weryfikacyjne przeprowadzane dla pojedynczego BSP. W ramach badań wykonano loty w przestrzeni otwartej i w pomieszczeniu. Podczas lotów w przestrzeni otwartej wykorzystywano odbiornik GPS jako element systemu nawigacji, natomiast w pomieszczeniu wykorzystany został system nawigacyjny Marvelmind. W ramach testów sprawdzono zdolność do wykonywania lotów zgodnie z zaprogramowanymi trajektoriami w pomieszczeniu jak również w przestrzeni otwartej. Testy obejmowały również zagadnienie stabilizacji wysokości, które jest szczególnie ważne przy wykonywaniu lotów

grupowych w pomieszczeniu, ze względu na małe separacje pionowe między poszczególnymi BSP wchodzącymi w skład systemu.

W kolejnej części rozprawy Pan Patryk Szywalski zaprezentował zorganizowane w Politechnice Opolskiej Laboratorium Autonomicznych Systemów Latających (LASL). W pomieszczeniu, które zostało przygotowane umieszczony został system nawigacji firmy Marvelmind. W rogach sali rozmieszczone zostały słupy nawigacyjne, na których umieszczono nadajniki systemu pozycjonowania. Na słupach znajdują się cztery nadajniki zamontowane na wysokości 5 m, które tworzą mapę 2D (współrzędne x i y). Dodatkowo cztery nadajniki wykorzystane są do określania położenia w przestrzeni 3D (współrzędna pionowa z), z tym że dwa nadajniki są współdzielone i system Marvelmind wykorzystuje je również do określania współrzędnych w płaszczyźnie Oxy . Trzecim elementem systemu jest stanowisko operatora systemu, który nadzoruje lot. Doktorant przedstawił również układ do rozbrajania BSP w przypadku awarii systemu. Prace związane ze zbudowaniem laboratorium Autor omówił w rozdziale siódmym rozprawy.

W trzeciej części pracy przedstawione zostały algorytmy generowania trajektorii w przestrzeni otwartej (rozdział ósmy) oraz algorytmy generowania trajektorii w pomieszczeniu (rozdział dziewiąty). Algorytmy te zostały poddane badaniom symulacyjnym. W rozdziale dziesiątym przedstawiona została weryfikacja opracowanych algorytmów zaimplementowanych w bezzałogowym systemie powietrznym. Doktorant wykonywał loty po trajektorii kwadratu i okręgu w ugrupowaniu pięciu, czterech, trzech i dwóch BSP. Dodatkowo badania podzielono na sterowanie zależne, czyli lot gdzie pozycja BSP zależy od ruchu pozostałych BSP oraz niezależne, w którym sterowanie położeniem BSP nie jest zależne od pozycji innych BSP.

2. Ocena tematu i zakresu pracy

Recenzowana rozprawa porusza bardzo istotną i aktualną problematykę. Obecnie obserwujemy dynamiczny rozwój systemów bezzałogowych, które wprowadzają nową jakość w obszarze wykorzystania wojskowego i cywilnego. Szczególnie duży wpływ na zmiany w taktyce użycia i organizacji wnoszą BSP klasy mini i micro. Małe bezzałogowe statki powietrzne w układzie wielowirnikowych platform latających mogą operować na bardzo

małym pułapie w obszarze występowania przeszkód naturalnych i sztucznych. Natomiast zwiększenie zdolności operacyjnych można uzyskać przez łączenie BSP w grupy i roje.

Grupa lub rój znacząco swoim działaniem odbiega od działania zespołów BSP. Powietrzny bezzałogowy system tego typu wykorzystuje BSP, których zadania cząstkowe składają się na synergiczną sumę zadań, realizujących główny cel systemu (główne zadanie systemu). Rój/grupa BSP zachowuje się i realizuje zadania jak duży wielozadaniowy BSP w sensie funkcjonalnym. Natomiast pojedynczy BSP, będący elementem roju może operować w środowisku, które jest niedostępne dla załogowych i bezzałogowych statków powietrznych oraz charakteryzować się znacznie gorszymi parametrami taktyczno-technicznymi.

Współczesne systemy BSP operują pojedynczo ze względu na zagrożenie kolizją z innymi bezzałogowymi lub załogowymi statkami powietrznymi. Problemu nie rozwiązują transpondery, ponieważ operowanie w szyku lub formacji, tak jak to robią załogowe statki powietrzne, nie gwarantuje odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa operacji powietrznej.

Dlatego prowadzenie badań w zakresie organizacji i sterowania formacjami bezzałogowych statków powietrznych jest zagadnieniem bardzo istotnym. Opracowany i przedstawiony w rozprawie doktorskiej system umożliwia jednocześnie sterowanie do pięciu BSP we wspólnej przestrzeni powietrznej. Autor rozprawy koncentruje się na zagadnieniu sterowania zdecentralizowaną strukturą BSP. Podstawą działania jest deterministyczny algorytm umożliwiający wymianę informacji między poszczególnymi platformami latającymi. Każdy z BSP zna swoje zadanie, jednak realizacja tego zadania jest zdeterminowana zachowaniem pozostałych BSP wchodzących w skład grupy.

Autor opracował oryginalne algorytmy sterowania trajektorią ruchu BSP. W swoich algorytmach uwzględnił niepewności pomiarowe systemu nawigacji. Przestrzeń operowania BSP została poddana dyskretyzacji, w której uwzględniono strefy bezpieczeństwa oraz strefy widoczności BSP przez system. Opracowany algorytm poszukuje optymalnych dróg jednocześnie pozwala na unikanie potencjalnych kolizji między BSP poruszającymi się we wspólnej przestrzeni. W opracowanym przez Pana Patryka Szywalskiego algorytmie został uwzględniony mechanizm generowania fragmentów drogi takich jak odcinek, wycinek koła i helisa. Trajektorja ruchu BSP jest budowana przez złożenie zdefiniowanych fragmentów.

3. Ocena rozprawy

Do podstawowych zalet rozprawy pod względem wyboru metod, zakresu badań, opracowania i prezentacji wyników oraz badawczego wkładu Doktoranta zaliczam:

- a) podjętą tematykę,
- b) opracowanie algorytmu wyznaczania trajektorii ruchu BSP w ugrupowaniu grupy,
- c) opracowanie algorytmu sterowania BSP w ugrupowaniu grupy,
- d) opracowanie bezzałogowego systemu latającego UAS,
- e) organizację Laboratorium Autonomicznych Systemów Latających.
- f) opracowanie i wykonanie badań symulacyjnych weryfikujących opracowane algorytmy,
- g) opracowanie i przeprowadzenie badań BSP wykonujących rzeczywiste loty grupowe.

Recenzowana praca wnosi istotny wkład w rozwój kompetencji krajowego potencjału naukowego w obszarze projektowania bezzałogowych systemów latających (UAS). Poziom, zakres prac i wyniki uzyskane przez Pana mgr inż. Patryka Szywalskiego są unikatowe w skali kraju. Zastosowanie podejścia zdecentralizowanego do sterowania systemem BSP podnosi niezawodność systemu, ponieważ utrata pojedynczych BSP nie oznacza utraty przez system zdolności do realizacji zadania. Tak zorganizowany system, w przeciwieństwie do podejścia centralistycznego, wymaga bardzo zaawansowanego systemu sterowania oraz utrzymania komunikacji między BSP (każdy z każdym). Systemy centralistyczne (hierarchiczne) charakteryzują się znacznie mniejszymi wymaganiami. Natomiast podejście przedstawione przez Pana Patryka Szywalskiego dotyczy innego ważnego problemu jakim jest operowanie we wspólnej przestrzeni wielu BSP. Obecnie problem wspólnego operowania bezzałogowych statków powietrznych i współdziałanie z załogowymi statkami powietrznymi we wspólnej przestrzeni powietrznej stanowi przedmiot zainteresowania wielu podmiotów naukowo-przemysłowych (Manned and Unmanned Teaming – MUT).

Przedstawiona w pracy metodyka postępowania szczególnie w zakresie oceny czujników i systemów pomiarowych nie budzi zastrzeżeń. Autor dysertacji opracował algorytmy oraz wykonał niezbędne oprogramowanie umożliwiające prowadzenie badań weryfikacyjnych systemu. Uważam, że przedstawiony zakres prac jest bardzo szeroki i wymagał od Doktoranta

znacznego zaangażowania i poświęcenia. Wykonanie dwóch konstrukcji BSP, zaplanowanie i przeprowadzenie badań weryfikacyjnych, zorganizowanie i wyposażenie laboratorium, to działania, które zasługują na szczególne uznanie. Przedstawione w pracy badania weryfikacyjne w zdecydowanym stopniu potwierdzają wysokie kwalifikacje i umiejętności Doktoranta.

Rozprawa jest zaprezentowana w sposób przejrzysty i logiczny. Kolejne rozdziały prezentują wyniki pracy jako logiczny i spójny ciąg, ukierunkowany na realizację celu pracy i potwierdzenie założonej tezy. Nie mam zastrzeżeń do strony redakcyjnej, można znaleźć w pracy kilka błędów stylistycznych, jednak ich ilość jest znikoma i nie wpływa w żadnym stopniu na jakość pracy. Należy w tym miejscu zauważyć, że drobne literówki (np. str. 105 „...także na wstępnie...” lub str. 41 „serownik”), nieprawidłowe końcówki (np. str. 23 „...charakterystyczny punktów...”) są bardzo nieliczne. Wyniki w formie rysunków i wykresów przygotowane są prawidłowo zgodnie z obowiązującymi zasadami (oznaczenie osi i podanie na osiach jednostek). Doktorant włożył wiele starań w przygotowanie szaty graficznej dysertacji oraz udokumentowanie wyników badań.

Po lekturze rozprawy nasunęły mi się pewne uwagi dotyczące pracy. Uwagi te nie wpływają na moją ocenę, jednak prosiłbym Pana mgr inż. Patryka Szywalskiego o uwzględnienie moich uwag w trakcie obrony oraz dalszej pracy nad rozwijaniem zaprezentowanej tematyki.

1. Proszę Autora by zwrócił uwagę na definicję UAV i UAS (str. 5). Używanie skrótów z języka angielskiego jest jednoznaczne ponieważ terminologia w języku polskim podlega ciągłej ewolucji i może być niejednoznaczna. Po latach dyskusji używamy pojęcia Bezzałogowy Statek Powietrzny (BSP) co oznacza statek powietrzny, który nie posiada załogi. Natomiast pilot zawsze uczestniczy w operacji powietrznej a jego rola maleje wraz z podnoszeniem poziomu autonomii.

Znacznie większym problemem jest tłumaczenie UAS. Ponieważ tłumaczenie bezpośrednio oznacza „Bezzałogowy System Powietrzny”, tu występuje zbieżność skrótu z BSP, co spowodowało używanie określenia „Bezzałogowy System Latający” (BSL) lub „Powietrzny System Bezzałogowy” (PSB). UAS tworzy jeden

- lub więcej UAV wraz komponentem naziemnym (np. stacją bazową, układem łączności, układem telemetrii, wyposażeniem obsługowym itp.). Proszę o dyskusję i ustosunkowanie się do definicji zawartych w pracy.
2. „...napęd w postaci czterech silników śmigłowych...” (str. 7). Proszę o wyjaśnienie terminu „silnik śmigłowy”. Raczej używamy pojęcia zespół napędowy obejmujący silnik elektryczny ze śmigłem.
 3. (str. 8) Klasyfikacja urządzeń latających. Helikopter należy do wiroplątów natomiast pozostałe statki powietrzne wymienione w tej grupie wykorzystują jednak inną zasadę działania. Wiropląt posiada wirnik, który jest odpowiednikiem skrzydła zamocowanego do specjalnej głowicy, natomiast „Quadcopter”, to „czterowirnikowiec”, który używa pędniki. W przypadku pozostałych „copterów” zasada jest podobna, w nazwie zdefiniowana jest liczba pędników. Mogą wystąpić zespołu silnik i dwa śmigła przeciwbieżne. Proszę o wyjaśnienie, dlaczego został przyjęty taki podział. Ponadto Autor pracy na str. 12 pisze „...potocznie nazywane quadcopterami”.
 4. „... loty automatyczne bądź autonomiczne...” (str. 18) poziomy autonomii wiążą się bezpośrednio z stopniem automatyzacji.
 5. Proszę używać terminologię lotniczą. W pracy jest używane „żyroskop” (str. 18), a prawidłowa nazwa to „giroskop”.
 6. Uważam stwierdzenie, że celem jest zbudowanie sytemu na poziomie autonomii 4 niestety jest zbyt optymistyczne (str. 29). Proszę o wyjaśnienie ponieważ zaprojektowany system raczej można zakwalifikować jako poziom 2. Tym bardziej, że ograniczenia jakim podlega UAS i konieczność spełnienia tak dużej liczby warunków powoduje, że wykazanie wysokiego poziomu autonomii staje się problematyczne.
 7. W pracy Doktorant używa pojęcia niezgodnie z przyjętą terminologią (str. 60). „... od kąta przechyłu od osi x bądź y .” Domyślam się, że chodzi o kąty pochylenia i przechylenia, natomiast osie powinny być oznaczone Ox i Oy . Podobnie tabela str. 67, opis str. 74. Układy współrzędnych w lotnictwie są znormalizowane np. PN-83 L-01010.01.

8. (str. 80) „*Operator systemu może wgrać trajektorię wpisując ją ręcznie ...*”. Proszę o wyjaśnienie „wgrać” i „wpisać ręcznie”. Jest to sformułowanie niezrozumiałe.
9. Błędna numeracja podrozdziałów (str. 82 ÷ 88) jest 5.2.1 powinno być 5.3.1; jest 5.2.2 powinno być 5.3.2; jest 5.3.1 powinno być 5.4.1; jest 5.3.2 powinno być 5.4.2.
10. Na rys. 6.17 (str. 99) przedstawiony jest profil zmiany wysokości. Można zaobserwować duże przeregulowania (skokowa zmian zadanej wysokości lotu o 50 cm powoduje przeregulowanie o wartość około 20 cm). Proszę o wyjaśnienie przyczyny.
11. Jedynym kryterium jakie pojawia się przy wyborze trajektorii optymalnej, to dystans do pokonania (podrozdział 9.5). W przypadku platform wielowirnikowych optymalny lot wiąże się z optymalnym wykorzystaniem energii. Ponieważ najwięcej energii zużywa BSP tego typu na utrzymanie w powietrzu. Dlatego każde przyspieszanie, hamowanie platformy, zawis, zmiana kierunku w punkcie ma bardzo duży wpływ na optymalizację lotu. Proszę o wyjaśnienie, dlaczego takie zostało przyjęte kryterium i jakie jest uzasadnienie jego użycia.
12. W rozdziale 10 przedstawione są badania weryfikacyjne. Istotna dla oceny zachowania się UAS jest informacja o położeniu względnym UAV. Ocenę taką można przeprowadzić analizując zmianę położenia poszczególnych UAV w funkcji czasu oraz zaznaczenie punktu początku i końca badania. Brak jest informacji o procesach przejściowych związanych z wykonywaniem ruchu poszczególnych UAV oraz czasu lotu.

Autor przedstawił trajektorię lotu BSP w przestrzeni tolerancji dla zadanej trajektorii, jednak brakuje oceny ilościowej poprawności wykonania zadania. Autor tylko stwierdził, że były przypadki wyjścia poza obszar tolerancji. Jednak takie zachowanie mogło być podyktowane nie błędami nawigacyjnymi, ale specyfiką pracy systemu zdecentralizowanego, ponieważ UAV unikając kolizji mógł zmieniać znacząco swoją pozycję.
13. W pracy występują przykłady używania języka potocznego np. „skacze”, „kształcie zygzaka”, „droga poszarpana” itp.

4. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę zakres i poziom recenzowanej pracy doktorskiej, przedstawione wyniki, badania eksperymentalne oraz jej bezpośredni związek z praktyką inżynierską oraz brak poważnych uwag merytorycznych stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, Dziennik Ustaw nr 65, poz. 595. Wnioskuje zatem o dopuszczenie mgr inż. Patryka Szywalskiego do publicznej obrony Jego rozprawy.