

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

Warszawa 11.11.2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Macieja SALWY
**p.t. " ZASTOSOWANIE ALGORYTMU STEROWANIA W ROJU
DLA BEZZAŁOGOWYCH OBIEKTÓW LATAJĄCYCH"**

wykonanej

w związku z uchwałą nr 47/2025 Rady Naukowej Dyscypliny
Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej
z dnia 15.05.2025 r.

pod kierownictwem dr. hab. inż. Izabeli Krzysztofik prof. PŚk

1. Wprowadzenie

Bezzałogowe systemy powietrzne (BSP) stanowią jeden z najbardziej rozwijających się segmentów rynku oraz obszaru badań naukowych. Analiza współczesnych trendów rozwojowych lotnictwa wskazuje na rosnące znaczenie samolotów bezzałogowych zwłaszcza w zastosowaniach militarnych.

Zapotrzebowanie na tego typu środki rośnie, a ich zastosowania są bardzo różne. Poza wojskowymi i policyjnymi, jakimi są na przykład skryta obserwacja wybranego obiektu statycznego, przemieszczających się ludzi i pojazdów i w rezultacie transmisja obrazu do centrum kierowania, interesują się nimi leśnicy, naukowcy, specjaliści od ruchu drogowego, strażacy i inni. Najczęściej systemy platform bezzałogowych wykonują zadania rozpoznania, by obserwować obiekty na ziemi lub morzu, przechwytywać i analizować elektroniczne emisje z ziemi, morza lub źródeł w przestrzeni. Nowoczesne platformy charakteryzują się w pełni cyfrowym sterowaniem, wiele z nich dysponuje możliwością autonomicznego startu i lądowania oraz zmianą celów i zadań w locie. Są też budowane platformy bojowe, które są w istocie latającymi, mobilnymi robotami zwalczającymi przeciwnika na morzu, lądzie i w powietrzu. Typowe bezzałogowe platformy latające dzielą się na klasy i kategorie w zależności od masy, charakteru wykonywanych zadań, wysokości na której działają i promienia operowania.

Przyszłe konflikty zbrojne, oraz rozwiązywanie sytuacji kryzysowych w znacznie większym niż dotychczas stopniu będą uzależnione od działań prowadzonych przez systemy platform bezzałogowych w przestrzeni powietrznej, oraz w kosmosie.

Znaczenie bezzałogowych statków powietrznych w ostatnim dziesięcioleciu wyraźnie wzrosło. Są niezastąpione podczas zadań długotrwałych, niebezpiecznych i prowadzonych w niesprzyjającym środowisku bez narażania życia człowieka. Prowadzone na szeroką skalę

badania nad udoskonaleniem wykorzystywanego wyposażenia oraz zastosowanie nowych technologii świadczą o rosnącej potrzebie użycia tego typu statków powietrznych. Dzięki postępowi technologicznemu permanentnie rozszerzające się możliwości wykorzystywania BSP do wykonywania zadań zarówno wojskowych, jak i cywilnych, co stwarza konieczność rozwiązywania wielu nowych problemów natury nie tylko konstrukcyjnej, ale i operacyjnej.

Główną przeszkodą do wdrażania samolotów bezzałogowych (BSP) w obszarze gospodarki cywilnej 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.

Wybór przez Autora tematyki rozprawy jest aktualny zarówno pod względem naukowym jak i aplikacyjnym oraz ściśle powiązany z potrzebami Sił Zbrojnych RP i służb porządku publicznego.

2. Omówienie treści rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Macieja SALWY przedstawiona jest na 256 stronach i składa się z 6 rozdziałów z wydzieleniem wstępu, wykazu ważniejszych skrótów i terminów oraz zakończenia, literatury i 4 załączników. W treści pracy Autor zaprezentował 217 pozycji literaturowych, zarówno krajowych, jak i zagranicznych.

W rozdziale pierwszym opisano koncepcje sterowania w roju BSP w oparciu o dostępną literaturę i analizę prowadzonych (dostępnych) projektów badawczych. Autor przedstawił zestawienie krajów przodujących w pracach badawczych nad rojem BSP (dronów) oraz ilościowe zestawienie badań prowadzonych w tym obszarze. Przedstawione wybrane cytaty z określonych publikacji czy też prowadzonych projektów sugerują dalsze kierunki rozwoju prac nad rojem dronów w różnym zastosowaniu.

Rozdział drugi zawiera cel i zakres pracy. Głównym celem pracy było opracowanie algorytmu sterowania grupą bezzałogowych obiektów latających w grupie (w roju). Doktorant zdefiniował w tym rozdziale modułowość struktury pracy w postaci opisu pozostałych rozdziałów tj.: jednostka latająca (dron), komunikacja (łączność, wymiana danych), środowisko graficzne (wizualizacja dla pilota-operatora sytuacji bieżącej) oraz matka-operator (stacja sterowania dronami).

W następnym rozdziale autor pracy zdefiniował obiekt badań w postaci quadcoptera (wielowirnikowca), zaprezentował uproszczony model fizyczny i matematyczny tego bezzałogowca oraz ukompletowanie w różne sensory niezbędne do jego sterowania wybranym dostępnym (komercyjnym) „autopilotem”.

Środowisko graficzne w oprogramowaniu CADowskim, niezbędne, dedykowane do BSP i sytuacji operacyjnej wielu wielowirnikowców Doktorant przedstawił w rozdziale czwartym.

Doktorant w rozdziale piątym opisał protokoły komunikacyjne z obiektami w powietrzu jak również wewnętrzne połączenia pomiędzy nimi. Komunikacja z „matką dronów” została oparta o rozwiązanie komercyjne poprzez protokół MAVlink, zaś

wymiana danych wewnątrz roju dronów Doktorant opracował autorskie oprogramowanie. Istotnym rozwiązaniem w tym obszarze było zaproponowanie autonomicznego działania roju dronów bez komunikacji z jej naczelnym obiektem.

W ostatnim szóstym rozdziale autor przedstawił sterowanie rojem dronów poprzez stację roboczą nazywając ją „matką-operatorem, matką roju”. Doktorant przygotował oprogramowanie wykonywane przez komputer pełniący rolę stacji naziemnej-matki roju.

W zakończeniu zawarto podsumowanie pracy w oparciu o jej modułowość.

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. Uważam, że recenzowana rozprawa została poprawnie opracowana pod względem merytorycznym, metodologicznym i językowym. Rozprawa zawiera oryginalne osiągnięcia poznawcze i praktyczne, a sam Autor wykazał się wysokimi kompetencjami w zakresie prowadzonych analiz teoretycznych i doświadczalnych (symulacyjnych). Uważam, że po raz pierwszy w kraju podjęto się kompleksowych analiz tak złożonego problemu jakim są bezzałogowe statki powietrzne w systemie zastosowania w roju.

Najbardziej wartościowe i oryginalne wartości przedstawionej do oceny dysertacji to:

1. Wszechstronny, dogłębny przegląd literatury w zakresie bezzałogowych statków powietrznych w uwzględnieniu lotów w formacji (w roju).
2. Kompleksowe opracowanie zagadnienia: modele obiektów latających, sterowanie lotem, komunikacja i wizualizacja obiektów w przestrzeni.
3. Autorskie oprogramowania zintegrowane z komercyjnymi rozwiązaniami wymagające dużej samodzielności i oryginalności.
4. Logiczna całość w postaci analizy zagadnienia sterowania UAV w roju, począwszy od aspektów dotyczących poszczególnych jednostek latających, przez autorski symulator, metodykę komunikacji do sterowania.

Praca zawiera również elementy dyskusyjne, drobne nieścisłości lub niedopowiedzenia.

1. Niepełny wykaz skrótów.
2. Nieliczne błędy literowe oraz sformułowania wymagające uściśleń w zakresie merytorycznym, stylistycznym i gramatycznym.
3. Dużo zwrotów, opisów i sformułowań angielskojęzycznych.

Uwagi dyskusyjne:

1. Wydaje się, że zagadnienie algorytmu sterującego zostało omówione w nieco mniejszym zakresie. Szerokie ujęcie tematyki wpłynęło niekorzystnie na główny cel związany z przygotowaniem algorytmu sterującego. Pomimo

- obszerności rozmiarów pracy, aspekt sterowania w roju nie został znacząco wyróżniony.
2. Podstawowe moduły pracy tj. jednostka latająca i jej wymagania, symulator graficzny do badań, komunikacja w roju, sterowanie obiektów w roju, zostały zaakcentowane jednakowo. Wątek dotyczący sterowania mógłby być omówiony z większą szczegółowością.
 3. Zauważalny jest brak analizy błędów w obliczeniach teoretycznych, symulacjach czy też w pomiarach bezpośrednich badań na rzeczywistym obiekcie.

Oceniając całość dokonań Doktoranta proponuję wyróżnienie pracy.

4. Wniosek końcowy

Podsumowując należy stwierdzić, że Doktorant mgr. inż. Maciej SALWA:

- zrealizował postawiony cel pracy oraz uzasadnił słuszność przyjętych założeń;
- zaprezentował interdyscyplinarność przedstawionej tematyki;
- uzyskał oryginalność wyników badań teoretycznych i symulacyjnych;
- wykazał się dobrą znajomością i umiejętnościami zastosowania metod prowadzenia prac badawczych z obszaru bezzałogowych systemów powietrznych z możliwością ich aplikacji.

Stwierdzam, że praca doktorska mgr. inż. Macieja SALWY spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2021 poz. 478 ze zm.) i wnioskuje do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.