

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

Warszawa 14.07.2026 r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Rafała Ożoga
**p.t. " OPRACOWANIE I KONSTRUKCJA BEZZAŁOGOWEGO
SAMOŁOTU SOLARNEGO AZ-5 KLASY LALE"**

wykonanej
na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej
pod kierownictwem
dr hab. inż. Roberta Głębockiego, prof. PW

Recenzja rozprawy doktorskiej została wykonana
na podstawie pisma RND.IM.521.1.2026 z dnia 08.03.2026r.
Przewodniczącego Rady Naukowej
Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej

1. Wprowadzenie

Praca dotyczy systemów zasilania hybrydowego (zasilanie solarne wspiera zasilanie akumulatorowe) małych bezzałogowych aparatów latających klasy LALE (Low Altitude Long Endurance). Poruszona tematyka jest istotna zarówno dla służb ratowniczych, monitorowania środowiska i patrolowania granic, jak również w rozwoju autonomicznych systemów długotrwałego dozoru. Jest ona obecnie rozwijana w licznych ośrodkach na świecie, jednak dotychczas nie dopracowano się dostatecznie dobrych rozwiązań umożliwiających pełną autonomię energetyczną małych dronów (o masie startowej do 10 kg), które pozwalałyby na ich masowe zastosowanie w regionach o umiarkowanym i zmiennym nasłonecznieniu. Poruszane w pracy zagadnienie bilansowania i pozyskiwania energii w trakcie poruszania się statku powietrznego po wyznaczonej trasie jest ważne i istotne. Może mieć znaczenie nie tylko naukowe, ale również gospodarcze. Ograniczony zasób energii stanowi jedną z głównych barier w rozwoju długodystansowych aplikacji bezzałogowych. Autor podjął się próby oceny sensowności stosowania BSP (bezzałogowych systemów powietrznych) w zakresie zwiększenia długotrwałości lotu dzięki wykorzystaniu energii słonecznej do zasilania zespołu napędowego. Odważne i ciekawe jest rozpatrzenie problemu dla bardzo małych statków powietrznych użytkowanych na małej wysokości w obszarze Polski. Przygotowano porównanie wybranych małych bezzałogowych statków powietrznych i ich możliwości w lotach bez wspomagania zasilaniem w locie oraz odniesiono je do pierwszych prób lotów wspomaganych na innych niż docelowy statek powietrzny.

Ciekawe jest przeanalizowanie dostępności i jakości energii słonecznej pod kątem pory roku i pory doby dla położenia geograficznego Polski. Praca jest interesująca i wnosi nowe cenne wyniki do krajowych opracowań na przedstawiany temat. Wybór tematyki rozprawy jest więc ściśle powiązany z potrzebami Sił Zbrojnych RP i służb porządku publicznego a wykorzystanie wyników przeprowadzonych badań, zwłaszcza opracowanie symulacyjno-eksperymentalnej metody badawczej systemów bezzałogowych, przyniesie wymierne korzyści materialne.

2. Struktura pracy

Przedstawiona rozprawa liczy 257 stron, a wykaz zacytowanej literatury obejmuje 75 pozycji. Rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów wliczając w to wstęp i podsumowanie. Zawiera ponadto bibliografię oraz wykaz skrótów i oznaczeń użytych w tekście. Tytuły rozdziałów to kolejno: Wstęp, Przegląd stanu wiedzy w dziedzinie samolotów solarnych, Model symulacyjny bezzałogowego samolotu solarnego, Wyniki symulacji komputerowych, Platformy testowe, Testy w locie i badania laboratoryjne oraz Podsumowanie. Jest wykonana starannie i dobrze pod względem edycyjnym. Rysunki, wykresy i wzory są czytelne. Zamieszczony na początku pracy spis skrótów i oznaczeń ułatwia zapoznanie się z jej treścią. Struktura pracy jest prawidłowa. Zakres prowadzonych w pracy badań przedstawiony jest logicznie. Autor najpierw omawia zagadnienia związane z historycznym i współczesnym rozwojem konstrukcji solarnych klas HALE i LALE na świecie, zwracając przy tej okazji uwagę na ograniczenia aerodynamiczne i technologiczne. Następnie wskazuje cel pracy i uzasadnienie podjęcia tematu badań w warunkach krajowych. Po tymże uzasadnieniu omawia zaproponowany przez siebie model fizyczny i jego elementy składowe. W dalszej części pracy przedstawia uzyskane wyniki badań symulacyjnych, charakterystykę zbudowanych platform doświadczalnych oraz wyniki prób laboratoryjnych i badań w locie. Praca jest przejrzysta i poza niektórymi fragmentami, nie stwarza trudności w interpretacji i zrozumieniu przeprowadzonych przez Autora badań i analiz.

3. Charakterystyka rozprawy i jej ocena

We wstępie Autor przedstawia przesłanki, które skłoniły go do podjęcia tematu, problem który będzie badał i rozwiązywał. Przedstawił metodologię opartą na zachowaniu stałej maksymalnej masy startowej (MTOW) na poziomie 7,0 kg dla trzech konfiguracji porównawczych (bez PV z pakietem 6S4P i ładunkiem, bez PV z pakietem 6S8P oraz z pełną instalacją solarną i pakietem 6S4P). Ekwiwalent masowy instalacji fotowoltaicznej zdefiniowano na 1,7 kg. Autor odwołuje się do zgromadzonej literatury, formułując trzy zasadnicze pytania badawcze (cele).

W rozdziale 2 „Przegląd stanu wiedzy w dziedzinie samolotów solarnych” Autor dokonał systematyki bezzałogowych aparatów solarnych, dzieląc je na klasy HALE (gdzie przeanalizowano m.in. projekty Sunrise I, Pathfinder, Centurion, Helios, Zephyr, PHASA-35) oraz LALE (SoLong, MARAAL, Skysailor, AtlantikSolar, AGH Solar Plane, TwinStratos). Opisano zaawansowane technologie, takie jak separacja epitaksjalna (ELO) ogniwi MicroLink Devices czy laminacja folią EVA. Bazując na wspomnianym przeglądzie, Autor trafnie

zidentyfikował ograniczenia związane z powstawaniem pęcherza laminarnego przy niskich liczbach Reynoldsa oraz konieczność stosowania płaskiej górnej powierzchni profilu w celu integracji ogniów, co wyznaczyło kierunek jego własnych prac projektowych. Należy podkreślić szeroką znajomość rozwiązań oraz pracę, jaką Autor wykonał nad zestawieniem wspomnianych konstrukcji.

W rozdziale 3 „Model symulacyjny bezzałogowego samolotu solarnego” Doktorant przedstawił charakterystykę matematyczną komponentów systemu. Wprowadzono cztery układy współrzędnych (związany z Ziemią, samolotem, aerodynamiczny i laboratoryjny) oraz klasyczny opis dynamiki lotu bryły sztywnej. Ponieważ model ten nie został zmodyfikowany na potrzeby pracy, zastosowany poziom szczegółowości jego opisu uważam za zbędny. W podrozdziale 3.5 wyznaczono współczynniki aerodynamiczne eksperymentalnego samolotu AZ-5B z profilami SD7032 i NACA0012 przy użyciu programu XFLR5, dzieląc płatowiec na panele (2000 dla skrzydła, 450 dla usterzenia poziomego, 400 dla pionowego). Autor słusznie skorygował doskonałość aerodynamiczną z wartości teoretycznej 27 do realnej 22,5 ze względu na opór kadłuba, jednak do pełnego opisu modelu zabrakło informacji o momentach bezwładności i dewiacji bryły.

Omawiany rozdział w podrozdziale 3.6 zawiera autorski model promieniowania słonecznego, który jest jednym z bardziej interesujących w pracy o dużej wartości merytorycznej. Integracja zależności astronomicznych, kalendarzowych i orientacji przestrzennej płatowca w celu wyznaczenia ilości energii słonecznej docierającej bezpośrednio i rozproszonej (przy uwzględnieniu stałej słonecznej 1353 W/m^2 i masy optycznej atmosfery) została doskonale udokumentowana i ma formę rzetelnego przewodnika krok po kroku. Model instalacji fotowoltaicznej (rozdział 3.7) uwzględniający sprawności ogniów, układu MPPT i procesów akumulatorowych jest adekwatny do potrzeb pracy. Z kolei podrozdział 3.8 opisujący strukturę autopilota powinna skupić się na charakterystykach kanałów sterowania (czasy regulacji, uchyby, tłumienie), a nie nad samą podstawową strukturą praw PID, co nie wymagało tak wysokiego poziomu szczegółowości opisu.

W rozdziale 4 „Wyniki symulacji komputerowych” Doktorant przedstawił wyniki badań symulacyjnych w środowisku MATLAB/Simulink odniesione do lokalizacji lądowiska Politechniki Warszawskiej Przasnysz-Sierakowo. Symulacje przeprowadzono dla tras w kształcie kwadratu, ośmiokąta i okręgu o promieniach od 50 m do 10 000 m. Badania symulacyjne przeprowadzono dość szeroko, dla wielu przypadków. Przeprowadzono je prawidłowo, a zebrany materiał jest bardzo interesujący, jednak opis wyników jest momentami zbyt zwięzły i nie zawsze wyczerpujący. W Misji Referencyjnej 1 wykazano, że lot po okręgu o promieniu 150 m stabilizuje czas lotu na poziomie 4h 48m, podczas gdy ciasne zakręty po małych kwadratach ($R=75 \text{ m}$) skracają ten czas do 4h 04m z powodu błędów śledzenia trasy przez autopilota. W rozdziale 4.3 przeprowadzono analizę parametryczną dla dni przesilenia letniego, zimowego i równonocy jesiennej 2025 roku. Wykazano uzyskanie pełnej autonomii i 14–15 godzin lotu latem (ładowanie baterii do 100%) oraz głęboki deficyt zimą, gdzie moc ogniów (maksymalnie 60–77 W) jedynie spowalniała rozładowanie baterii. Udowodniono, że tor lotu po okręgu o promieniu 300 m zmniejsza zapotrzebowanie na moc o około 10,4% w stosunku do ciasnych zakrętów. Podrozdział 4.3.4 dowiódł, że w przypadku lotów falowych z przewyższeniem, dodatkowe koszty energetyczne

wznoszenia przewyższają zyski z lepszego oświetlenia paneli. Logiczną strukturę zakłóca jedynie mało intuicyjne zatytułowanie podrozdziału 4.3.

Rozdział 5 „Platformy testowe” opisuje poszczególne elementy wykorzystywanych systemów. Autor dokonał wyboru seryjnych modułów FunCub NG oraz Lentus firmy Multiplex, adaptując je poprzez implementację autopilota Orange Cube, telemetrii RFD 868x, rurki Pitota oraz autorskiego układu rejestracji natężenia światła opartego o mikrokontroler Arduino i czujniki BH1750. Zamieszczenie skrajnie szczegółowych danych technicznych tych struktur (Tabela 5.1) oraz technologii wykonania tradycyjnego płatownca AZ-5A (rozdziały 5.3.1.1–5.3.1.4) uznaję za ciekawostkę technologiczną, która nie ma bezpośredniego przełożenia na naukowe rezultaty i niepotrzebnie zwiększa objętość rozprawy. W opisie platformy FunCub zabrakło analizy, jak wzrost masy startowej o 42% (z 1,38 kg do 1,98 kg z powodu aparatury o wadze 0,58 kg) i podniesienie obciążenia powierzchni z 3,46 kg/m² do 5,66 kg/m² wpłynęło na błędy walidacji modeli. Na osobną uwagę zasługuje projekt docelowego samolotu AZ-5B, zintegrowanego ze 109 ogniwami SunPower C60 o sprawności do 23% (teoretycznie 186,4 W mocy) oraz pakietem akumulatorów Li-Ion 6S4P Molicel (20000 mAh).

Rozdział 6 „Testy w locie i badania laboratoryjne” opisuje wyniki weryfikacji doświadczalnej układu doprowadzonego do poziomu demonstratora technologii (około TRL 6). Pierwsza część przynosi udaną walidację modelu promieniowania na bazie pięciu scenariuszy lotnych realizowanych przez samoloty FunCub i Lentus. Druga część prezentuje laboratoryjne pomiary generowanej mocy rzeczywistej instalacji AZ-5B przy pełnym i niepełnym naładowaniu akumulatorów. Badania dały wyniki wartościowe, jednak w rozdziale tym zauważam poważny brak bezpośredniego, ilościowego porównania wyników symulacji komputerowych z danymi rzeczywistymi dla samolotu AZ-5B, co uniemożliwia ocenę dokładności modelu. Powodem niedoskonałości części empirycznej było odłożenie rzeczywistych prób w locie zintegrowanego samolotu AZ-5B z aktywnym napędem solarnym na okres po wydaniu dysertacji, co osłabia końcową walidację. Dodatkowo, niekonsekwencja terminologiczna na wykresach może dezorientować czytelnika. Niemniej jednak uzyskane wyniki laboratoryjne i pomiary środowiskowe są interesujące i wartościowe.

Rozdział 7 „Podsumowanie” zawiera wnioski i podsumowanie pracy, które są dobrze umotywowane, trafne i zasadne, oraz plany dalszych prac Autora nad opisywaną tematyką.

4. Podsumowanie

Uważam, że zakres wykonanych przez Autora analiz, jest wystarczający dla uzasadnienia postawionych celów pracy. Przyjęto odpowiednie metody badawcze. Temat pracy ściśle odpowiada zawartej w niej treści. Układ rozdziałów i proporcje tematyczne w nich zamieszczone, sformułowania, styl i układ graficzny stanowią logiczną całość. W zakresie merytorycznej oceny rozprawy, można uznać, że cel pracy został osiągnięty, a założony zakres pracy został zrealizowany. Pracę stanowi cenny wkład do rozwoju metod projektowania, modelowania matematycznego i bilansowania energetycznego solarnych bezzałogowych statków powietrznych klasy LALE w warunkach klimatycznych Europy Środkowej

Uwzględniając podstawowe elementy recenzowanej rozprawy doktorskiej takie jak:

- oryginalne wyniki badań teoretycznych i eksperymentalnych;
- umiejętność budowy interdyscyplinarnych modeli matematycznych i algorytmów układów pozycjonowania i bilansowania energii;
- możliwość integracji systemów sterowania BSP i układów fotowoltaicznych;
- sposób prowadzenia badań symulacyjnych i eksperymentalnych oraz oceny ich wyników;
- potencjalne zastosowanie opracowanej metody do weryfikacji innych systemów bezzałogowych systemów powietrznych;

oceniam rozprawę doktorską mgr. inż. Rafała OŻOGA pozytywnie.

5. Wniosek końcowy

Przedstawiam Szanownej Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej wniosek o dopuszczenie Pana mgr inż. Rafała Ożoga, do publicznej obrony i przyjęcia ww. pracy, jako podstawy do nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

Uważam więc, że rozprawa doktorska pana mgr. inż. Rafała Ożoga pt. „Opracowanie i konstrukcja bezzałogowego samolotu solarnego AZ-5 klasy LALE” w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668, z późn. zm.) oraz wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.