



Politechnika
Wrocławska



PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

Wrocław, 5.05.2025 r.

Recenzja pracy doktorskiej mgra inż. Radosława Puchalskiego zatytułowanej:
„Detekcja uszkodzeń jednostek napędowych w trakcie lotu bezzałogowego statku
powietrznego” przygotowanej pod kierunkiem: dra hab. inż. Wojciecha
Giernackiego, prof. PP; w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i
Technologie Kosmiczne.

Recenzja została sporządzona w związku z powołaniem przez przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej pana prof. dra hab. inż. Wojciecha Szelaąga, do pełnienia funkcji recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne panu mgr. inż. Radosławowi Puchalskiemu.

Niniejsza recenzja ma za zadanie zgodnie z Art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki (t.j. Dz.U. 2017 poz. 1789, dalej jako: u.s.n.), mającego zastosowanie w sprawie w związku z art. 175 ust. 1 Przepisów wprowadzających ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 3.7.2018 r. (Dz.U. 2018 r. poz. 1669) ocenić czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wkładu w dyscyplinę.

W ramach przeprowadzonej recenzji zostaną ocenione następujące punkty:

1. Tematyka pracy doktorskiej i jej wkład w dyscyplinę Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Ad. 1. Temat pracy doktorskiej brzmi: „Detekcja uszkodzeń jednostek napędowych w trakcie lotu bezzałogowego statku powietrznego”.

Wraz ze wzrostem liczby bezzałogowych statków powietrznych (BSP) rośnie ryzyko awarii ich układów napędowych, zwłaszcza śmigieł, kluczowych dla bezpieczeństwa lotu. Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy diagnostyki stanu śmigieł wielowirnikowych dronów prowadzonej automatycznie podczas lotu, z wykorzystaniem danych sensorycznych. Doktorant w ramach realizacji pracy opracował lekki, niezależny system pomiarowy, w którym zastosował metody uczenia maszynowego do klasyfikacji uszkodzeń w czasie rzeczywistym. Wyniki badań eksperymentalnych otrzymanych przez doktoranta potwierdzają skuteczność zaproponowanego podejścia oraz jego potencjał implementacyjny w systemach pokładowych BSP.

W mojej ocenie – wybrany temat rozprawy, jest aktualny i stanowi istotny wkład dla

dyscypliny naukowej: **Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.**

2. Zagadnienia naukowe rozprawy – teza oraz tezy szczegółowe.

W pracy została postawiona następująca teza główna badawcza:

- *“Możliwa jest automatyczna i precyzyjna diagnostyka uszkodzeń śmigieł bezzałogowego statku powietrznego podczas lotu, prowadzona w czasie rzeczywistym, oparta na uczeniu maszynowym wykorzystanym do przetwarzania sygnałów pomiarowych w dziedzinie czasu, z użyciem jedynie podstawowego mikrokontrolera”.*

Ponadto zdefiniowano trzy tezy szczegółowe:

- I. *“Skuteczna klasyfikacja uszkodzeń różnych typów śmigieł wielowirnikowych dronów może być realizowana w czasie rzeczywistym przy użyciu metod automatycznego przetwarzania cyfrowych sygnałów w dziedzinie czasu z dodatkowego układu sensorycznego”.*
- II. *“W diagnostyce stanu elementów wykonawczych drona można zapewnić przetwarzanie sygnałów, dające informację o lokalizacji i rozmiarze uszkodzenia, realizowane w trybie ciągłym, na bazie jedynie mikrokontrolera”.*
- III. *“Wiarygodną ocenę skuteczności klasyfikatorów w określonych warunkach pracy można przeprowadzić, wykorzystując nowe, wielokryterialne wskaźniki oceny”.*

Zarówno teza główna jak i tezy szczegółowe zostały udowodnione w pracy.

3. Struktura pracy

Ad. 3. Niniejsza rozprawa doktorska składa się ze **158** stron (wliczając stronę tytułową, streszczenia - w języku polskim oraz angielskim, spis treści, wykaz skrótów i oznaczeń, spis rysunków, spis tabel oraz literaturę) i została podzielona na **10** rozdziałów (w tym nieponumerowana bibliografia). W pracy zawarto **34** tabele, **47** rysunków i **35** wzorów. Bibliografia składa się z ponad **156** pozycji, w skład w których wchodzi **9** publikacji Autora rozprawy.

Rozdział pierwszy wprowadza w tematykę uszkodzeń komponentów BSP, ich wpływu na bezpieczeństwo lotu i potrzebę skutecznej diagnostyki. Przedstawiono cele pracy, tezy badawcze oraz podstawowe pojęcia. **Rozdział drugi**, który stanowi przegląd literatury, opisuje aktualny stan wiedzy na temat diagnostyki (FD) dronów, stosowane podejścia i ich ograniczenia. Pokazuje niszę badawczą i potrzebę dalszych badań. W **rozdziale trzecim** scharakteryzowano sensory (akcelerometry, żyroskopy, mikrofony MEMS) wykorzystywane do pozyskiwania danych diagnostycznych oraz ich właściwości i możliwości zastosowania. **Rozdział czwarty 4** – szczegółowo opisuje autorski układ pomiarowy, jego konstrukcję i działanie. Przedstawiono algorytm działania oraz dokonane optymalizacje sprzętowo-programowe. W **rozdziale piątym** Autor zaprezentował budowę publicznego zbioru danych eksperymentalnych, parametry BSP biorących udział w testach oraz sposoby rejestracji i prezentacji sygnałów. **Rozdział szósty** dotyczy przygotowania i wdrożenia

oprogramowania diagnostycznego. Opisuje on także proces trenowania modeli SSN i ich implementację w systemie wbudowanym. W **rozdziale siódmym** Autor przeanalizował istniejące metryki i przedstawia dwie nowe, uwzględniające zarówno liczbę klas, dokładność, jak i czas detekcji. Prezentuje wyniki walidacji różnych modeli. W **rozdziale ósmym** zawarł natomiast ocenę skuteczności klasyfikatorów, wpływu parametrów przetwarzania na działanie systemu oraz porównanie z wynikami innych prac badawczych. **Rozdział dziewiąty** stanowi podsumowanie i wnioski, a autor zawarł w nim ocenę realizacji celów pracy, omówienie oryginalności uzyskanych rezultatów oraz wskazał przyszłe kierunków badań i możliwości rozwoju metod diagnostycznych. **Rozdział dziesiąty (nieponumerowany)** zawiera spis literatury składający się ze **156** pozycji.

2. Uwagi redakcyjne, krytyczne oraz pytania do pracy.

Ad. 4.

- W pracy cytowania pojawiają się w losowej kolejności (także w poszczególnych odniesieniach nie są we właściwej kolejności), co bardzo rzuca się w oczy - np. Str. 1 "[144, 106, 136]".
- Czy od roku 2022 zaobserwowano jakieś zmiany jeśli chodzi o liczbę incydentów związanych z użytkowaniem BSP? Jakie są tendencje i co może na nie wpływać?
- Dlaczego akurat dane z drona Falcon 5 zostały wykorzystane w pierwszej fazie badań? Co wpłynęło na taki wybór?
- Dlaczego Autor wybrał także drona Parrot Bebop 2?
- Dlaczego loty próbne trwały akurat ok. 3 minut? Czy była to wystarczająca długość lotu?
- Skąd wybór kolejnego drona 3DR Solo?
- Co łączy wybrane przez Autora drony?
- Str. 45: *"Niektóre pliki dotyczą tylko jednego rodzaju czujnika lub nawet konkretnej jego osi, inne zawierają odczyty z dwóch lub trzech czujników w różnych konfiguracjach poszczególnych osi pomiarowych."* - jak to wpływa na "jednorodność" pomiarów?
- Str. 46: *"Dane ze wszystkich osi czujników, które podlegały akwizycji, zostały sprawdzone pod kątem ich kompletności i poprawności."* - w jaki sposób dane zostały sprawdzone pod kątem wymienionej kompletności i poprawności?
- Str. 48: Rys. 5.4. - nieczytelna czcionka.
- Str. 51: Rys. 5.6. - j.w.
- Str. 52: Rys. 5.7. - j.w. Rys. 5.9. - nieczytelny.
- Str. 55: *"Dotychczas opisane prace dotyczące sprzętu i oprogramowania do akwizycji danych, ich późniejsza obróbka oraz przygotowanie repozytorium PADRE, były etapami przygotowawczymi do realizacji najważniejszego celu."* - czym jest najważniejszy cel? Brzmi to bardzo pompatycznie.
- Jaką wersję języka Python wykorzystano? Czy Autor korzystał z dodatkowych, gotowych bibliotek? Jeśli tak, to jakich?
- Jakie techniki SI (sztucznej inteligencji) zostały wykorzystane w mikrokontrolerze?
- Str. 71: *"Jednak uzyskany bezwzględny wynik nie stanowi definitywnej oceny konkretnego modelu"*. - co w takim razie może stanowić taką definitywną ocenę konkretnego modelu?

- Str. 74: Dlaczego wydzielono tylko 15% danych do testów offline?
- Str. 77: *"Uzyskana dokładność klasyfikacji wynosi prawie 99%"* - czyli ile?
- Str. 82: *"(...) najlepszy model osiągnął ponad 98% dokładności"* - j.w. - proszę być bardziej precyzyjnym.
- W tabelach nie zaznaczono istotnych wartości, co znacznie poprawiłoby ich czytelność.
- Str. 123: *"Spory odsetek artykułów [23, 155, 47, 64, 34, 93, 41, 91, 94, 90, 114, 151] opisuje eksperymenty przeprowadzane na symulowanych danych."* - czy jest to prawidłowe sformułowanie?
- Pytania do pracy:
 1. Jakie konkretne czynniki (techniczne, organizacyjne, obliczeniowe) wpływały na decyzję o niepowtarzaniu niektórych eksperymentów, mimo zmian w standardach testowych
 2. Czy w rozprawie zastosowano strategie walidacyjne kompensujące brak jednolitego zbioru parametrów dla wszystkich testów? Jeśli tak, to jakie?
 3. W jaki sposób klasyfikatory były oceniane pod względem zdolności do wykrywania uszkodzeń, na które nie były trenowane?
 4. Czy autor dokonał analizy błędów klasyfikacyjnych (false positives / false negatives) w przypadku niezdefiniowanych wcześniej typów usterek? Jakie wnioski wynikają z tych analiz?
 5. Jakie mechanizmy uogólniania w sieciach neuronowych (np. dropout, regularizacja, struktura warstw) zostały wykorzystane, by umożliwić wykrywanie nieznanych uszkodzeń?
 6. Na jakiej podstawie stwierdzono, że uproszczony model spełnia identyczne zadanie klasyfikacyjne co bardziej złożony, skoro nie były one testowane na identycznych danych?
 7. Czym dokładnie podejście autora różni się od klasycznego binarnego wykrywania uszkodzeń? Jakie korzyści oferuje?
 8. Dlaczego autor nie zdecydował się na zastosowanie transfer learningu lub fine-tuningu w celu poprawy wyników detekcji nietrenowanych klas anomalii?
 9. Jakie jest największe osiągnięcie tej pracy?
 10. Jakie są plany wdrożeniowe Pańskiego rozwiązania?

3. Podsumowanie.

Ad. 3. Niniejsza rozprawa jest bardzo starannie i estetycznie zredagowana, pozbawiona poważniejszych błędów edycyjnych. Zdarzają się w niej niestety błędne (z językowego punktu widzenia) sformułowania. Rysunki w większości są czytelne i starannie wykonane. Można zauważyć bardzo dużą dbałość o szczegóły, co pozytywnie wpłynęło na odbiór całej pracy.

Uwagi krytyczne mają głównie kosmetyczny charakter, a pytania są bardziej z natury dociekliwych.

Autor rozprawy jest autorem/współautorem **12** publikacji naukowych (Google Scholar) i posiada następujący indeks Hirscha: **5** (Google Scholar) - **139** cytowań, **4** (Scopus) - **126** cytowań, **3** (Web of Science) - **83** cytowania.

Niektóre prace doktoranta posiadają bardzo dużo cytowań jak na ten etap kariery naukowej:

- **Puchalski, R.**, & Giernacki, W. (2022). UAV fault detection methods, state-of-the-art. *Drones*, 6(11), 330. - 75 cytowań wg GS;
- Al-Haddad, L. A., Giernacki, W., Shandookh, A. A., Jaber, A. A., & **Puchalski, R.** (2024). Vibration signal processing for multirotor UAVs fault diagnosis: Filtering or multiresolution analysis. *Eksploatacja i Niezawodność*, 26(1). - 23 cytowania wg GS;
- **Puchalski, R.**, Bondyra, A., Giernacki, W., & Zhang, Y. (2022, August). Actuator fault detection and isolation system for multirotor unmanned aerial vehicles. In *2022 26th International conference on methods and models in automation and robotics (MMAR)* (pp. 364-369). IEEE. - 15 cytowań wg GS.

Świadczy już to o pewnej rozpoznawalności doktoranta w środowisku naukowym. Ponadto w **8** pracach doktorant jest wiodącym, a w **1** jedynym autorem.

Szkoda, że Autor nie zawarł informacji na temat pozyskanych grantów czy udziału w projektach naukowych oraz/lub nt. otrzymanych nagród czy wyróżnień.

W mojej ocenie, rozprawa doktorska **mgra inż. Radosława Puchalskiego** zawiera bardzo wartościowe wyniki, a ponadto ma potencjalną wartość praktyczną - wdrożeniową. Moja ocena jest więc jak najbardziej **pozytywna**. Moim zdaniem niniejsza praca prezentuje cenne wyniki badań i jest znaczącym osiągnięciem naukowym w **dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne**. Spełnia ona również w mojej ocenie wszystkie wymogi zawarte w aktualnie obowiązującej Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" w sprawie warunków i trybu przeprowadzania przewodów doktorskich i może być przedmiotem publicznej obrony.

Wnioskuje także o wyróżnienie rozprawy mgra inż. Radosława Puchalskiego.



.....
Dr hab. inż. Aleksandra Kawala-Sterniuk, prof. uczelni
Katedra Sztucznej Inteligencji
Wydział Informatyki i Telekomunikacji
Politechnika Wrocławska
aleksandra.kawala-sterniuk@pwr.edu.pl