

Zielona Góra, 27.03.2025r.

Prof. dr hab. inż. Marcin Witczak
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych
Wydział Nauk Inżynieryjno-Technicznych
Uniwersytet Zielonogórski
Ul. Podgórna 50
65- 246 Zielona Góra
M.Witczak@issi.uz.zgora.pl



PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgra inż. Radosław Puchalski
pod tytułem

**„Detekcja uszkodzeń jednostek napędowych w trakcie lotu bezzałogowego statku
powietrznego”**

opracowana na zlecenie

Politechniki Poznańskiej

I. Problem naukowy i obszar rozprawy

Problematyka naukowa poruszana w recenzowanej rozprawie doktorskiej dotyczy diagnostyki stanu śmigieł wielowirnikowych dronów, przeprowadzanej w zautomatyzowany sposób w trakcie wykonywanego lotu. W ciągu ostatnich lat doszło do dynamicznego wzrostu liczby zastosowań bezzałogowych statków powietrznych operujących w przestrzeni lotniczej. W związku z tym, że zwiększyła się liczba incydentów i niebezpieczeństw wynikających z uszkodzeń i anomalii pracy ich układów napędowych i wykonawczych, pojawiła się potrzeba znalezienia rozwiązania, które pozwoli na wczesne i skuteczne wykrywanie wszelkich awarii i uszkodzeń. Z uwagi na fakt, że liczba BSP będących w użytkowaniu specjalistycznych służb wciąż rośnie, coraz ważniejszą kwestią stało się zapewnienie bezpieczeństwa lotów. W ramach pracy przedstawiono niezależny od systemów pokładowych drona układ akwizycji danych sensorycznych, który umożliwi zebranie pomiarów z czujników zamontowanych w

poblizu śmigieł. Na podstawie zgromadzonych danych i przeglądu literatury, w pracy zostały rozpatrzone scenariusze obejmujące różne scenariusze uszkodzeń związane z uszkodzeniami śmigieł w różnorodnych zestawieniach ich lokalizacji na ramionach BSP. Celem rozwiązania postawionego problemu, w pracy przedstawiono dwa wskaźniki oceny jakości klasyfikatorów oraz wykazano wysoką skuteczność detekcji dla zaproponowanego podejścia w zakresie lokalizacji i identyfikacji uszkodzeń śmigieł wielowirnikowych BSP. Proces ten stanowi istotne i aktualne wyzwanie, które wymaga opracowania optymalnych rozwiązań. Przegląd literatury przedstawiony w rozprawie ukazuje szereg potencjalnych rozwiązań, odnoszących się do tego problemu. W pracy szczególny nacisk został położony na znalezienie optymalnego rozwiązania, tak aby opracowany system pomiarowy był lekki i uniwersalny (możliwy do użycia w dowolnym dronie wielowirnikowym) oraz aby zaproponowane metody przetwarzania sygnałów cechowała możliwie niska złożoność obliczeniowa.

W wyniku analizy problemu badawczego niniejszego doktoratu, autor sformułował następującą tezę badawczą:

“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.”

oraz trzy tezy szczegółowe:

- 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.
- W diagnostyce stanu elementów wykonawczych drona można zapewnić przetwarzanie sygnałów, dających informacje o lokalizacji i rozmiarze uszkodzenia, realizowane w trybie ciągłym, na bazie jedynie mikrokontrolera.
- Wiarygodność oceny skuteczności klasyfikatorów w określonych warunkach pracy można przeprowadzić, wykorzystując nowe, wielokryterialne wskaźniki oceny.

Natomiast do najważniejszych zadań badawczych należy zaliczyć:

- Przeprowadzenie w trakcie lotu drona automatycznej diagnostyki (detekcji, lokalizacji i identyfikacji) uszkodzeń z wykorzystaniem dedykowanych urządzeń pomiarowych zamontowanych na jego pokładzie.
- Wykrywanie w czasie rzeczywistym (pomiędzy kolejnymi pomiarami z sensorów) anomalii i uszkodzeń śmigła drona, zarówno przed startem, jak i w trakcie lotu.
- Określenie rodzaju usterki, jej rozmiaru oraz miejsca wystąpienia.

- Dostarczenie informacji o wykrytych nieprawidłowościach niezbędnych do podjęcia decyzji o możliwości kontynuowania lotu operatorowi lub oprogramowaniu wykonującemu zadania FTC.
- Implementację zastosowanych metod dla komercyjnych i autorskich BSP celem niskokosztowego zwiększenia ich niezawodności.

Podsumowując, należy zaznaczyć, że praktycznym rezultatem rozprawy jest zaprojektowanie niezależnych od systemów pokładowych drona układów akwizycji danych sensorycznych, które posłużą do zbierania pomiarów z czujników zamontowanych w pobliżu śmigieł.

II. Koncepcja i struktura rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera 9 rozdziałów oraz bibliografię obejmującą 156 pozycji. Podstawę pracy stanowią rozdziały od trzeciego do siódmego łącznie, które prezentują oryginalne wyniki naukowe doktoranta w zakresie rozwoju metod wykazujących potencjał implementacji przedstawionych rozwiązań.

Kolejne rozdziały pracy zorganizowane są w następujący sposób:

- **Rozdział 1** stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy. Prezentuje on znaczenie problematyki badawczej w odniesieniu do opisywanych w literaturze zagrożeń związanych z awariami elementów wykonawczych drona. W rozdziale został precyzyjnie opisany cel pracy oraz tezy. Autor nakreślił również możliwości oferowane przez współcześnie dostępną aparaturę pomiarową i obliczeniową. Rozdział został również poświęcony wytłumaczeniu podstawowych pojęć związanych z tematyką bezzałogowych statków powietrznych. W niniejszym rozdziale autor również precyzyjnie wprowadził czytelnika do tematyki uszkodzeń i ich definicji w kontekście BSP.
- Autor poświęcił **rozdział 2** na określenie obecnego stanu wiedzy dotyczącego detekcji uszkodzeń dronów. Na podstawie przeglądu literatury, doktorant opisał najczęściej stosowane podejścia oraz osiągnięcia z ich zastosowaniem rezultaty. W rozdziale zostały również wskazane ograniczenia i problemy, z którymi mierzą się badacze i naukowcy pracujący nad diagnostyką BSP.
- W **rozdziale 3** autor skupił się na sygnałach i układach sensorycznych oraz na precyzyjnym opisie i analizie działania dostępnych czujników inercyjnych i mikrofonów. Autor zaczął dywagacje od akcelerometru, wskazując jego możliwości pomiarowe. Kolejnym opisanym czujnikiem był żyroskop wraz z zastosowaniem prędkości kątowych. Autor opisał sygnały akustyczne, które mają na celu umożliwienie wykrycia anomalii na podstawie sygnału dźwiękowego, poprzez znajdowanie różnic w ich widmie dzięki znajomości rozkładu częstotliwości dźwięku podczas normalnej pracy. Autor podkreślił znaczenie dostępności omówionych czujników i mikrofonów.

- **Rozdział 4** autor poświęcił na system akwizycji danych sensorycznych. Doktorant opisał budowę układu pomiarowego i sprecyzował jego zasadnicze zadanie, czyli pobieranie i zapisywanie danych z czujników podłączonych do systemu w trakcie lotu BSP. Autor precyzyjnie opisał działanie systemu akwizycji i poparł go rysunkiem. Wraz z użytkowaniem omawianego systemu, pojawiły się pomysły dotyczące kolejnych usprawnień. Autor podkreślił również znaczenie modyfikacji, które mają na celu zapewnienie niezawodności oraz zwiększenie szybkości działania procesu akwizycji danych.
- **Rozdział 5** poświęcony jest przedstawieniu struktury i sposobu korzystania z ogólnodostępnego repozytorium danych pomiarowych, które powstało dzięki użyciu wiedzy z rozdziału trzeciego w zakresie czujników i mikrofonów oraz systemu akwizycji, opisanego w rozdziale czwartym. Autor również przedstawił sposób prezentacji danych w niniejszym repozytorium. Autor zaprezentował parametry statków powietrznych oraz użytych układów pomiarowych, które posłużyły w przeprowadzonych badaniach i eksperymentach. Doktorant precyzyjnie omówił procedurę rejestrowania danych inercyjnych i sygnałów akustycznych. Autor podsumował rozdział opisem zgromadzonych i udostępnionych pomiarów pod względem parametrów statystycznych.
- W **rozdziale 6** autor skupił się na diagnostyce uszkodzeń w czasie rzeczywistym, podkreślając, że badania i wnioski zgromadzone w poprzednich rozdziałach były etapami przygotowawczymi do osiągnięcia najważniejszego celu. Niniejszy rozdział koncentruje się na rozwiązaniach, które umożliwiłyby dostarczenie informacji o charakterze występujących uszkodzeń w możliwie najszybszy i niezawodny sposób. Doktorant przedstawił opracowanie systemu detekcji uszkodzeń oraz precyzyjnie opisał poszczególne kroki przygotowywania oprogramowania. Ostatni podrozdział autor wykorzystał na opis działania systemu detekcji oraz podkreślił znaczenie zastosowania poszczególnych etapów przetwarzania oraz ich konkretnych parametrów. Autor przedstawił też sposób diagnostyki uszkodzeń w czasie rzeczywistym, a całą analizę poparł schematami i rysunkami.
- **Rozdział 7** został poświęcony przedstawieniem wyników testów walidacyjnych różnych modeli klasyfikatorów, które uprzednio zostały przygotowane z użyciem pomiarów zebranych przy wykorzystaniu systemu akwizycji danych sensorycznych opisanych w rozdziale 4. Przeprowadzone testy dotyczyły modeli czasu rzeczywistego, natomiast autor wziął również pod uwagę niektóre klasyfikatory, które nie spełniają tych kryteriów. Doktorant w trakcie wykonywania badań przyjął jednolity sposób prezentacji wybranych parametrów przy szczególnym uwzględnieniu określonych metryk, które umożliwiły obiektywną analizę każdego klasyfikatora. Celem przeprowadzonych badań było dokonanie oceny jakości prezentowanych modeli. Rezultatem eksperymentów było wskazanie niedoskonałości w ich stosowaniu, w

wyniku czego autor zaprezentował dwie nowe metryki, które stanowiłyby rozwiązanie dla istniejących ograniczeń.

- Autor poświęcił **rozdział 8** na analizę uzyskanych przez rezultatów badań. W niniejszym rozdziale zostało zaprezentowane znaczenie parametrów przetwarzania w kontekście skuteczności klasyfikacji oraz istnienia opóźnień w procesie uzyskiwania rezultatów. Autor precyzyjnie porównał otrzymane wyniki z rezultatami innych badań i eksperymentów dotyczących klasyfikacji uszkodzeń śmigieł BSP.
- **Rozdział 9** pełni funkcję podsumowania rozprawy i został również poświęcony ocenie stopnia realizacji założonych celów w kontekście przedstawienia oryginalności uzyskanych rezultatów na tle obecnego stanu wiedzy. Autor sklasyfikował metody, które zostały użyte w badaniach. Autor podsumował całą rozprawę i dowiódł, że zrealizował najważniejsze cele w kontekście wykazania tezy głównej i trzech tez szczegółowych. Rozdział został zakończony wnioskami sformułowanymi przez autora.
- **Wykaz bibliograficzny** obejmuje 156 pozycji, które bardzo dobrze odzwierciedlają istniejący stan wiedzy.

III. Oryginalne osiągnięcia i znaczenie poznawcze

Przedmiotem pracy badawczej było zaprojektowanie niezależnych od systemów pokładowych drona układ akwizycji danych sensorycznych, które posłużą do zbierania pomiarów z czujników zamontowanych w pobliżu śmigieł. Autor wykazał, że określenie miejsca, rodzaju i rozmiaru uszkodzeń śmigieł bezzałogowych pojazdów latających można przeprowadzać z wykorzystaniem sygnałów z niskokosztowych czujników inercyjnych bądź mikrofonów.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy można zaliczyć:

- Skuteczne przeprowadzenie detekcji anomalii na wczesnym etapie i opracowanie metod detekcji anomalii i uszkodzeń śmigieł wielowirnikowych dronów.
- Skuteczne przeprowadzenie automatycznej diagnostyki uszkodzeń z wykorzystaniem systemów znajdujących się na pokładzie BSP.
- Przeprowadzenie eksperymentów, które skutecznie wykazały, że z użyciem niskokosztowych czujników można wykrywać niebezpieczne dla działania drona uszkodzenia.
- Zaprojektowanie niezależnych od systemów pokładowych drona układ akwizycji danych sensorycznych, które posłużą do zbierania pomiarów z czujników zamontowanych w pobliżu śmigieł

Zaproponowana metoda i przeprowadzone badania umożliwiają rozwiązanie problemów związanych z faktem, że wraz ze zwiększeniem się użycia BSP, zwiększyła się również liczba incydentów i niebezpieczeństw wynikających z uszkodzeń i anomalii pracy ich układów

napędowych i wykonawczych. Świadczy to jednoznacznie o osiągnięciu przez autora celu postawionego we wstępnej części pracy.

Dorobek naukowy autora rozprawy obejmuje 6 artykułów w czasopismach indeksowanych w bazie MNiSW:

- Przegląd Naukowo-Metodyczny "Edukacja dla Bezpieczeństwa" (20 pkt.);
- Pomiar Automatyka Robotyka (70 pkt.);
- Przegląd Elektrotechniczny (70 pkt.);
- Journal of Intelligent & Robotic Systems (100 pkt.);
- Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability (140 pkt.);
- Drones (20 pkt.);

cztery prace w materiałach międzynarodowych konferencji naukowych:

- 2023: International Conference on Optimization, Learning Algorithms and Applications;
- 2024: IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII);
- 2023: International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS);
- 2022: 26th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR);

Uwzględniając wymienione osiągnięcia naukowo-badawcze oraz fakt ich opublikowania w wyżej wymienionych pozycjach, uważam że mgr inż. Radosław Puchalski zrealizował cel rozprawy, udowodnił postawione tezy oraz wykazał się wiedzą i umiejętnością samodzielnego rozwiązywania trudnych problemów teoretycznych i praktycznych szeroko rozumianej współczesnej automatyki i robotyki.

IV. Uwagi i komentarze dotyczące rozprawy

Uwagi ogólne:

- 1) Na stronie 5 autor wskazuje, że „W rozprawie stosowane są również zamiennie synonimy, takie jak anomalia, awaria, defekt czy usterka.” Powyższe stwierdzenie nie jest zbyt szczęśliwe ponieważ w literaturze:

- Uszkodzenie (ang. fault) definiowane jest jako niepożądana zmiana przynajmniej jednego z parametrów systemu w stosunku do wartości nominalnej.
- Awaria (ang. failure) definiowana jest jako permanentna niezdolność systemu do wykonania zadanej misji.

Uważam, że autor niepotrzebnie wprowadził powyższe synonimy, co implikuje pewne zamieszanie w tekście pracy, np. na stronie Str. 4 „Dzięki energooszczędności i małej wadze wydają się optymalnym wyborem do praktycznych zastosowań w dziedzinach wykrywania usterek oraz sterowania odpornego na uszkodzenia bezzałogowych pojazdów latających.” lub Str. 55 „Najbardziej złożone zadanie czeka system sterujący

w przypadku awarii, która umożliwia kontynuowanie lotu, ale w zauważalny sposób zmienia jego parametry.”

- 2) W rozdziale 4 wskazano, że dane pochodzące z modułów inercyjnych IMU oraz mikrofonów MIC zbierane są w różnych przedziałach czasowych. Jak wskazuje doktorant, jest to związane z dostępnymi zasobami obliczeniowymi i energetycznymi. Jaki wpływ ma takie rozwiązanie na czas detekcji i lokalizacji uszkodzeń?
- 3) W rozdziale 6, autor proponuje zastosowanie klasyfikatora neuronowego dla potrzeb detekcji i lokalizacji uszkodzeń. Brak jest jednak motywacji odnośnie zastosowania SNN je struktury, itd. Autor podaje jedynie informacje odnośnie funkcji aktywacji neuronów w poszczególnych warstwach (str. 57). Celowe wydaje się przedstawienie schematu blokowego klasyfikatora ze wszystkimi sygnałami wyjściowymi i wyjściowymi, jak również wprowadzenie jego opisu analitycznego.
- 4) Analiza funkcjonowania procesu uczenia klasyfikatora ogranicza się do przedstawienia wykresów na rys. 6.3. W mojej opinii, brakuje odpowiedniej analizy statystycznej otrzymanych rezultatów, która podniosłaby wartość poznawczą pracy.
- 5) Wprowadzenie przedziałów ufności związanych ze statystykami przedstawionymi w Tab. 7.1 ułatwiłoby ich praktyczną analizę.
- 6) Wszystkie uszkodzenia rozważane w pracy zostały zdefiniowane jako utrata powierzchni śmigła o znanym rozmiarze. W rzeczywistości, utrata powierzchni może mieć charakter losowy. Jak dostosować rozwiązania zaproponowane przez doktoranta do takich sytuacji?

V. Podsumowanie recenzji

Reasumując, podniesione wyżej uwagi krytyczne i komentarze nie wpływają jednak na wysoką ocenę oryginalnych i opublikowanych osiągnięć naukowo-badawczych, zasadniczych wyników zawartych w recenzowanej pracy oraz jej ogólną pozytywną ocenę. Przedstawione wyniki stanowią niewątpliwie rozwiązanie istotnego problemu naukowego o praktycznym wymiarze, a także dobrze świadczą o erudycji Doktoranta. Stwierdzam zatem, że przedstawiona przez magistra inżyniera Radosława Puchalskiego rozprawa pt. „Detekcja uszkodzeń jednostek napędowych w trakcie lotu bezzałogowego statku powietrznego” spełnia w pełni kryteria stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2024 poz. 1571) i wnoszę o dopuszczenie mgra Radosława Puchalskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Biorąc pod uwagę jakość rezultatów rozprawy oraz związane z nią publikacje w czasopismach JCR wnioskuję również o jej wyróżnienie.

Prof. dr hab. inż. Marcin Witczak

