

Prof. dr hab. inż. Damian Grzechca
Politechnika Śląska
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki
Katedra Elektroniki, Elektrotechniki i Mikroelektroniki

Gliwice, 28 marca 2025 r.

WYDZIAŁ AUTOMATYKI,
ROBOTYKI I I ELEKTROTECHNIKI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA

03-04-2025

WPŁYNĘŁO

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: Detekcja uszkodzeń jednostek napędowych w trakcie lotu bezzałogowego statku powietrznego

Autor rozprawy: mgr inż. Radosław Puchalski

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Wojciech Giernacki, prof. PP

PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologia Kosmiczne

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej na podstawie uchwały z dnia 16.01.2025 i pisma z dnia 3.02.2025 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Pana Prof. dr. hab. inż. Wojciecha Szelaąga.

1. Informacje wstępne

Rozprawa doktorska mgr inż. Radosława Puchalskiego związana jest z diagnostyką bezzałogowych statków powietrznych (BSP), kładąc największą uwagę na detekcję uszkodzeń elementów napędowych. Zauważyć należy, że diagnostyka wszelkich anomalii związanych z uszkodzeniem śmigieł jest krytyczna, ponieważ prowadzić może do poważnych uszkodzeń BSP oraz innych podsystemów, w jakie wyposażony jest dron. Dlatego szczególną uwagę Doktorant położył na wykrywanie uszkodzeń na wczesnym etapie ich wystąpienia wraz z określeniem kosztów procesu diagnostycznego. Praca doktorska napisana jest w języku polskim, została podzielona na 9 rozdziałów, wykaz skrótów i oznaczeń, spisy tabel i rysunków, oraz spis literatury, które łącznie zajmują 139 stron. Spis literatury składa się z 156 pozycji w których znaleźć można 9 publikacji Doktoranta, z czego w 6 publikacjach jest pierwszym Autorem.

Pan mgr Radosław Puchalski swój wysiłek badawczy koncentruje na wczesnym i skutecznym wykrywaniu awarii i uszkodzeń mogących skutkować niekontrolowanym zachowaniem drona w czasie jego eksploatacji. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska ma charakter praktyczny, a postawione cele opisane w rozdziale 1.2 wskazują na duże doświadczenie zespołu badawczego w aspekcie diagnostyki BSP.

Rozdział pierwszy to wstęp do tematyki uszkodzeń, ich detekcji oraz dalszej diagnostyki ukierunkowany na bezzałogowe statki powietrzne (BSP). Zdefiniowano tutaj problem badawczy, cel, tezę główną oraz trzy tezy cząstkowe. Cel pracy jest sformułowany opisowo i dotyczy opracowania odpowiednich technik umożliwiających automatyczną diagnostykę drona w trakcie lotu z zachowaniem reżimu czasu rzeczywistego. Teza główna jest również zrozumiała i prawidłowo sformułowana. Pewne wątpliwości budzi trzecia teza cząstkowa, gdyż wykracza poza zakres badawczy pracy i dotyczy wskaźników oceny klasyfikatorów, co nie jest

przedmiotem pracy. W drugim rozdziale dość zgrabnie przedstawiono obecny stan wiedzy dotyczący detekcji uszkodzeń BSP. Na podstawie przedstawionych prac stwierdzić można, że temat rozprawy jako aktualny i pożądany praktycznie. Doktorant przeprowadza czytelnika przez najczęściej stosowane podejścia do diagnostyki dronów, wskazując jednocześnie ograniczenia i problemy, z którymi zajmują się naukowcy pracujący w tym obszarze badawczym. Następnie, w rozdziale trzecim opisano układy sensoryczne i dane pomiarowe wykorzystywane w badaniach, scharakteryzowano najczęściej spotykane konstrukcje czujników oraz sposób wyznaczania sygnałów wyjściowych. Największą część tego rozdziału stanowi opis akcelerometru, żyroskopu i mikrofonu cyfrowego produkowanych w technologii MEMS (mikroukład elektromechaniczny, ang. *MicroElectroMechanical System*). Połączono wymienione układy MEMS z tematyką rozprawy, a w ostatnim akapicie zawarto również nieformalną tezę rozprawy doktorskiej, która z powodzeniem mogłaby stanowić (po drobnych korektach) dodatkową tezę cząstkową.

System akwizycji danych sensorycznych, jego budowę oraz sposób działania zawarto w rozdziale czwartym. Podkreślić należy, że Doktorant ma solidne podstawy inżynierskie, a dodatkowo opis tej części wskazuje, że dobrze rozumie zagadnienia i problemy związane z systemami akwizycji danych. Na szczególną uwagę zasługuje podejście krytyczne i analiza wykonana na podstawie przeprowadzonych badań cząstkowych do zaprojektowanego systemu, dzięki czemu potrafi umiejętnie skorygować poprzednie rozwiązanie poprzez wprowadzenie właściwych modyfikacji. W rozdziale piątym, bardzo rzetelnie i starannie opisano strukturę pozyskanych danych, sposób ich pozyskania oraz ewentualnego wykorzystania przez osoby zainteresowane tematem diagnostyki dronów. Następnie, w szóstym rozdziale zawarto opis opracowanych systemów detekcji uszkodzeń wraz z oprogramowaniem do przetwarzania danych w ramach diagnostyki przeprowadzanej w czasie rzeczywistym. Proces ten zawiera fazę trenowania klasyfikatora oraz jego implementację w mikrokontrolerze. Następnie przedstawione jest działanie systemu detekcji. Rozdział ten potwierdza duże zdolności inżynierskie Doktoranta i swobodę implementacji algorytmów w systemach wbudowanych.

Najważniejszym rozdziałem pracy w aspekcie nowych metod diagnostycznych jest rozdział siódmy. Zaprezentowano w nim powszechnie używane wskaźniki oceny jakości klasyfikatorów, zwrócono uwagę na pewne splaszczanie w interpretacji wyników badań, a na podstawie wyciągniętych wniosków Doktorant zaproponował dwie nowe metryki do oceny klasyfikacji z krytycznym czasem przetwarzania, dodatkowo Doktorant proponuje 3 rodzaje wstępnego przetwarzania sygnałów, tj. analizę wprost w dziedzinie czasu, przekształcając zebrane dane w oknie o różnej długości w dziedzinę częstotliwości oraz analizę czasowo-częstotliwościową. Następnie przeprowadza proces strojenia klasyfikatora i analizuje jakość detekcji na zbiorze danych, który nie brał udziału w procesie uczenia. Zamieszczone wyniki badań eksperymentalnych dla różnych modeli SSN (sztuczna sieć neuronowa, ang. *Artificial Neural Network*) klasyfikującej wybrane anomalie dla zaproponowanych scenariuszy testowych. Rozdział ósmy to analiza uzyskanych wyników, m.in. wpływu parametrów przetwarzania na skuteczność klasyfikacji wraz z uwzględnieniem występujących opóźnień w procesie uzyskiwania jej wyniku.

Rozprawę podsumowano w rozdziale dziewiątym, gdzie Doktorant odniósł się do celów oraz tez pracy w kontekście oryginalności uzyskanych wyników na tle obecnego stanu wiedzy.

W podsumowaniu zawarto również pewne przemyślenia związane z kierunki dalszych badań i możliwości rozwoju stosowanych metod.

2. Zagadnienia naukowe rozpatrywane w rozprawie

Diagnostyk i testowanie systemów jest zagadnieniem nietrywialnym i stale poszukiwane są nowe, bardziej skuteczne metody umożliwiające efektywną analizę danych pomiarowych. Dynamicznie rozwijająca się branża bezzałogowych statków powietrznych (BSP) jest aktualnie jednym z tych gałęzi przemysłu, które poszukują nowych, automatycznych metod diagnostycznych, a praca doktorska wpisuje się w ten trend. Rozwój ten wymusza na zespołach badawczych poszukiwanie i tworzenie nowych metod diagnostycznych, które będą skutecznie diagnozować powstałe w trakcie lotu usterki. Celem pracy Doktorskiej jest diagnostyka jednostek napędowych bezzałogowego statku powietrznego na potrzeby wykrycia ewentualnych nieprawidłowości w pracy śmigieł BSP. Dodatkowym obostrzeniem, które postawił sobie Doktorant, jest zdolność przeprowadzania detekcji w trybie ciągłym, bez zbędnych opóźnień, bezpośrednio podczas wykonywanego lotu. Ponadto system powinien być w stanie określić rodzaj wykrytej usterki, rozmiar uszkodzenia oraz miejsce jego wystąpienia. Oznacza to, że oprócz samej detekcji ważna jest również lokalizacja uszkodzenia, co w wyniku pewnej fuzji danych w systemie decyzyjnym, powinno dostarczyć wiarygodną informację dla operatora, który podejmuje decyzję o dalszym przebiegu misji. Jeżeli uszkodzenie nie jest uszkodzeniem krytycznym, to misja może być kontynuowana, a przegląd i ewentualna naprawa niesprawnych podzespołów może być przeprowadzona po wylądowaniu. W przypadku krytycznego defektu, BSP powinien zostać sprowadzony na ziemię w trybie awaryjnym, aby ograniczyć potencjalne uszkodzenia własne lub otoczenia tak, aby zminimalizować ryzyko zranienia ludzi, zwierząt lub innych obiektów zarówno ruchomych, jak i nieruchomych. Wyzwaniem jest więc wczesne i skuteczne wykrywanie wszelkich awarii i uszkodzeń mogących skutkować niekontrolowanym zachowaniem drona w czasie jego eksploatacji. Praca doktorska mgr inż. Radosława Puchalskiego wpisuje się w aktualne trendy i zawiera szereg autorskich rozwiązań popartych przedstawionymi badaniami. Stwierdzić, więc można, że tematyka rozprawy nie budzi zastrzeżeń, a teza główna pracy postawiona w rozdziale 1.3 jest prawidłowa:

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. Oprócz tezy głównej wprowadzono 3 tezy szczegółowe.

Podsumowując, stwierdzić można, że problem rozważany przez Doktoranta jest aktualny, a rozprawę zaliczyć można do dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

3. Analiza źródeł, stan wiedzy i zastosowań w przemyśle

(Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?)

Bibliografia zawiera 156 pozycji w których znaleźć można 8 publikacji Doktoranta. Uważam, że przegląd literatury przedstawiony w rozdziale pierwszym oraz osadzenie tematu rozprawy w aspekcie aktualnych wyzwań, zastosowań w przemyśle oraz konieczności wprowadzenia odpowiednich metod diagnostycznych są przedstawione bardzo rzetelnie. Nie ma wątpliwości, że automatyczne metody diagnostyczne są potrzebne głównie w aspekcie optymalizacji kosztów, więc badania związane z automatycznymi metodami diagnostycznymi są pożądane naukowo oraz praktycznego celem optymalizacji kosztów ewentualnego serwisu.

4. Metody i założenia użytych metod

Szybka diagnostyka uszkodzeń jest kluczowym elementem nowoczesnych systemów latających, a wykrycie nieprawidłowości na wstępnych etapach degradacji podzespołów umożliwia bezzwłoczną reakcję, np. w postaci awaryjnego lądowania, co może uchronić BSP przed większymi uszkodzeniami spowodowanymi ewentualnym rozbiciem.

Doktorant stworzył swoją niezależną platformę pomiarową, której głównym celem jest zebranie danych pomiarowych z czujników inercyjnych w technologii MEMS. Doktorant słusznie stwierdził, że drgania z konstrukcji drona przenoszone są drogą powietrzną i emitują sygnały akustyczne, które mogą być cenne diagnostycznie, dlatego zaproponowano rozmieszczenie czujników w pobliżu silników napędzających śmigła osadzone bezpośrednio na jego wale. W ten sposób pozyskane dane są dalej przekształcane tak, aby uzyskać wiarygodną informację o aktualnym stanie drona. Doktorant założył, że uszkodzenia BSP, którego napędy nie pracują w warunkach nominalnych, generuje drgania, a nieprawidłowo pracujące śmigło jest przyczyną krótkotrwałych lub ciągłych przechyłów pojazdu latającego (na skutek nie zrównoważenia sił ciągu generowanych w poszczególnych jednostkach napędowych na ich elementach wykonawczych, tj. śmigłach). Założenia przedstawione w pracy są więc prawidłowe, a dalsze badania skierowane są na przekształcenie czasowych danych wejściowych, ekstrakcję cech z sygnałów w dziedzinie czasu i/lub częstotliwości oraz implementację i strojenie sieci neuronowej do klasyfikacji poszczególnych uszkodzeń. Ze względu na trudność w stopniowaniu poszczególnych usterek Doktorant założył występowanie kilku wybranych np. uszkodzenie końcówki śmigła 1cm i 2cm. Uszkodzone śmigła pochodziły z lotów, w których dochodziło do rzeczywistych kolizji, albo były celowo uszkodzone, w sposób naśladujący rzeczywiste defekty. Przy niepełnym zbiorze usterek reprezentowanych przez dane wejściowych wprowadzenie klasyfikatora neuronowego jest uzasadnione, a sam proces dostrajania sieci jest czasochłonny i wymaga szeregu powtórzeń tak, aby uzyskać efektywny model diagnostyczny.

Doktorant przeprowadził eksperymenty z wykorzystaniem różnych konstrukcji czterowirnikowych BSP. Loty przeprowadził w laboratorium i w otwartej przestrzeni, wykonując takie manewry jak: wznoszenie, opadanie, zmianę kierunku i orientacji. Całość podejścia prowadzi do opracowania koncepcji technik umożliwiających:

- przeprowadzenie w trakcie lotu drona automatycznej diagnostyki (detekcji, lokalizacji i identyfikacji) uszkodzeń z wykorzystaniem dedykowanych urządzeń pomiarowych montowanych na pokładzie drona wielowirnikowego,
- wykrywanie w czasie rzeczywistym (pomiędzy kolejnymi pomiarami z sensorów) anomalii i uszkodzeń śmigieł 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 prototypowych (autorskich) BSP celem niskokosztowego zwiększenia ich niezawodności.

Podsumowując tę część, stwierdzam, że założenia przyjęte w pracy są uzasadnione, a użyte metody prawidłowe.

5. Oryginalność rozprawy, samodzielny i oryginalny dorobek Autora

W recenzowanej rozprawie opracowano metodę detekcji anomalii i uszkodzeń śmigieł wielowirnikowych dronów wraz z lokalizacją i częściową identyfikacją. Niewątpliwie, docenić należy opracowanie koncepcji, budowę oraz dużą staranność opisu bazy danych PADRE, którą opracowano z wykorzystaniem własnej, dedykowanej platformy akwizycji danych. Zaplanowano szereg eksperymentów statycznych i dynamicznych dla wyselekcjonowanych wstępnie uszkodzeń. Doktorant postawił sobie trudne zadanie wykrywania i klasyfikacji uszkodzeń w czasie rzeczywistym, co niejako narzuca wbudowanie systemu diagnostycznego do BSP. Uważam, że przedstawiona praca jest wartościowa i posiada bardzo duży potencjał aplikacyjny, a dodatkowo stwarza możliwość porównania nowych algorytmów diagnostycznych BSP z wykorzystaniem ogólnodostępnych danych pomiarowych. Do najważniejszych osiągnięć pana mgr. inż. Radosława Puchalskiego zaliczam:

- opracowanie automatycznej diagnostyki (detekcji, lokalizacji i identyfikacji) uszkodzeń BSP z wykorzystaniem sieci neuronowej oraz dedykowanej platformy akwizycji danych; podejście to umożliwia określenie miejsca i rozmiaru uszkodzenia śmigła,
- optymalizację algorytmu automatycznej diagnostyki umożliwiającej wykrywanie anomalii i uszkodzeń śmigieł drona, zarówno przed startem, jak i w trakcie lotu, w czasie krótszym niż kolejne odczyty z czujników, zapewniając klasyfikację przeprowadzaną 500 razy na sekundę,
- analizę przydatności danych pomiarowych do diagnostyki poprzez opracowanie klasyfikatorów z użyciem różnych czujników i ich kombinacji oraz danych pozyskanych w dziedzinie czasu, selekcję komponentów częstotliwościowych oraz wybranych sygnatur czasowo-częstotliwościowych w postaci transformacji falkowej,
- implementację zastosowanych metod dla komercyjnych i prototypowych (autorskich) BSP celem niskokosztowego zwiększenia ich niezawodności,
- budowę repozytorium PADRE, zawierającej usystematyzowane dane pomiarowe z przeprowadzonych symulacji i udostępnioną innym zespołom badawczym celem dalszej pogłębionej i niezależnej analizy,

- wprowadzenie wskaźnika *QACT* który umożliwia porównanie systemów diagnostycznych (klasyfikatorów) z uwzględnieniem dokładności klasyfikacji, liczby klas oraz czasu przetwarzania.

Podsumowując, Doktorant bardzo przejrzysto i logicznie prowadzi czytelnika przez poszczególne elementy procedury diagnostycznej. W pracy dostrzec można duży wysiłek skierowany na maksymalizację skuteczności i jakości klasyfikatora neuronowego oraz minimalizację czasu potrzebnego na wypracowanie informacji o aktualnym stanie BSP. Ponownie należy zaznaczyć, że Doktorant zbudował własną platformę pomiarową i to w oparciu o lokalny mikrokontroler przeprowadzał diagnostykę określając rodzaj, miejsce i rozmiar uszkodzenia dwu- i trójpłatowych śmigieł. Modyfikacje platformy obejmowały wprowadzenie kodów świetlnych informujących o bieżącym stanie programu, które pozwalały na identyfikację np. błędnie podłączonego czujnika lub ustawienia niewłaściwego zakresu pomiarowego.

W związku z tym, uważam, że rozprawa wnosi wkład w nauki inżynierijno-techniczne i zaliczyć ją należy do dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

6. Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

Podczas czytania rozprawy nasunęły się uwagi, głównie o charakterze polemicznym i dyskusyjnym, które przedstawione są poniżej:

1. Doktorant pisze, że masa systemu akwizycji danych jest niewielka i wynosi 15g. Czy wartość ta uwzględnia masę akumulatora? Jaki jest pobór energii i czas pracy systemu? Wydaje się, że dodanie kolejnego elementu na drona zmienia jego dynamikę dlatego należałoby wskazać wartość relatywną masy systemu w stosunku do masy badanego drona.
2. Stwierdzenie, że „W dalszym przetwarzaniu dane z termometru nie brały udziału, ponieważ nie są one skorelowane ze stanem śmigieł.” jest nieprecyzyjne, ponieważ materiał z jakiego wykonane są śmigła, np. sprężystość powinna być zależna od temperatury, a zmiana sprężystości materiału powinna mieć wpływ na dźwięk pochodzący z uszkodzonych śmigieł.
3. Zastanawiający jest pewien brak systematyczności w eksperymentach z uszkodzoną końcówką śmigła. W typowym podejściu minimalna liczba zmian w danym uszkodzeniu powinna wynosić 3, co w konsekwencji umożliwia wyciągnięcie wniosku, czy wpływ degradacji śmigła na analizowane parametry (czasem tylko wybrane) jest liniowy, czy nieliniowy. Czy któreś z ekstrahowanych cech jest liniowo skorelowane z uszkodzeniem?
4. Proszę o wyjaśnienie porównania przedstawionego na rys. 7.9, które jest mylące, ponieważ badano różną liczbę przypadków.
5. Pewne wątpliwości budzi podejście do diagnostyki uszkodzeń wielokrotnych, ponieważ rozważając ciągłą analizę stanu rotorów wystąpienie jednoczesne podwójnego uszkodzenia (nie mówiąc już o potrójnym) jest mało prawdopodobne. Jakie jest

uzasadnienie praktyczne wystąpienia uszkodzeń wielokrotnych, przy tak silnej determinacji na analizę danych w czasie rzeczywistym.

9. Wniosek końcowy

W świetle powyższych uwag stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska, pomimo uwag o charakterze dyskusyjnym i polemicznym, spełnia warunki określone w art. 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz.U. 2018, poz. 1668 z późn. zm.) *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie mgr. inż. Radosława Puchalskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Mając na uwadze, dorobek publikacyjny, aktualność prowadzonych badań, uzyskane wyniki dla wypracowanych modeli hybrydowych, które dodatkowo zostały wdrożone na zbudowanej przez Doktoranta platformie pomiarowej, a przede wszystkim opracowanie ogólnodostępnej bazy danych PADRE, wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Radosława Puchalskiego, jeśli spełnione są pozostałe wymogi formalne stawiane przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej.


.....
prof. dr hab. inż. Damian Grzechca