

**Tytuł, stopień, imię i nazwisko**  
prof. dr hab. inż. Bogdan Kwolek



data 29.11.2022 r.

PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY  
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika  
i Technologia Kosmiczne

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

### **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

przygotowana dla Rady dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika  
Politechniki Poznańskiej

**Tytuł rozprawy: Automatyczna diagnostyka uszkodzeń wirników nośnych robota latającego**

**Autor rozprawy: mgr inż. Adam Bondyra**

**Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Kasiński**

1. Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska dotyczy detekcji uszkodzeń rotorów wielowirnikowych robotów latających. Prace badawcze obejmowały projektowanie oraz budowę kompletnych systemów na potrzeby diagnostyki uszkodzeń wirników robota latającego. Zasadnicza część prac badawczo-eksperymentalnych dotyczyła detekcji, identyfikacji i klasyfikacji pewnej klasy uszkodzeń wirników nośnych. Diagnostyka uszkodzeń realizowana była w oparciu o inteligentne modele, które trenowano, a następnie ewaluowano na rzeczywistych sygnałach wibroakustycznych. Sygnały wibroakustyczne rejestrowano w trakcie lotów w oparciu o zaprojektowane i wykonane przez Doktoranta mikroprocesorowe układy pomiarowe. Autorska metoda analizy i klasyfikacji wzorców widmowych sygnałów pomiarowych z pokładowego IMU dorównuje skuteczności metod znanych z literatury, a w dodatku umożliwia określenie typu uszkodzenia. Oryginalnym rozwiązaniem jest metoda oparta o sieć sensorową, która poprawia skuteczność identyfikacji uszkodzenia, a zarazem umożliwia zlokalizowanie uszkodzenia. Na dorobek Autora składa się także metoda, która operuje na sygnałach akustycznych rejestrowanych przez macierz mikrofonów. Metodę wyróżnia to, że podobnie jak w metodzie opartej na pomiarach z sieci sensorów możliwe jest wykrycie uszkodzenia, określenie jego podtypu, a także identyfikacja uszkodzonego zespołu napędowego. Omawiana metoda jest jednak znacznie bardziej kosztowna z uwagi na analizę cepstralną sygnałów akustycznych rejestrowanych przez miniaturową macierz mikrofonów. Proponowane rozwiązanie jest komplementarne w stosunku do autorskich rozwiązań dla diagnostyki uszkodzeń rotorów wielowirnikowych robotów latających w oparciu o system pokładowy. Na potrzeby trenowania i ewaluacji proponowanych modeli diagnostycznych poprzez techniki rozpoznawania wzorców zgromadzono kilka zestawów danych, które rejestrowano w szeregu misjach z różnymi trajektoriami lotów. Autor zaproponował oryginalne rozwiązania oraz zbudował kompletne systemy, w szczególności systemy pokładowe, które umożliwiają diagnostykę uszkodzeń w określonym i znanym czasie. Tezy rozprawy wyrażają się w przekonaniu iż (i) analiza online sygnałów sensorów pokładowych umożliwia wczesne wykrycie i lokalizację uszkodzenia wirnika nośnego robota latającego, (ii) sygnał

wibroakustyczny pochodzący z pracującego wirnika jest wystarczającym źródłem informacji pozwalającym na stwierdzenie uszkodzenia oraz identyfikację, (iii) charakter propagowania się w konstrukcji UAV wibracji generowanych przez uszkodzony wirnik pozwala na zlokalizowanie miejsca wystąpienia uszkodzenia z dokładnością do ramienia konstrukcji. Tezy pracy są konsekwentnie rozwijane w rozprawie. Prawdziwość tez została wykazana empirycznie. Tematyka podjęta w rozprawie jest w pełni uzasadniona pod względem poznawczym, a na płynące z niej wnioski istnieje zapotrzebowanie w obszarze robotyki. Wyniki badań eksperymentalnych są rzetelne i przekonujące.

2. Rozprawa napisana jest w języku polskim, składa się z ośmiu rozdziałów i liczy łącznie 153 strony. Bibliografia liczy łącznie 123 pozycje. Streszczenia pracy przedstawiono zarówno w języku polskim jak i angielskim. W rozdziale pierwszym zawarto ogólne wprowadzenie do tematyki pracy, zaprezentowano znaczenie problematyki badawczej, przedstawiono cel pracy oraz genezę podjętych badań naukowych, postawiono tezy badawcze, a następnie omówiono układ i treść rozprawy. W następnym rozdziale zaprezentowano stan wiedzy w dziedzinach związanych z diagnostyką uszkodzeń wirników nośnych. W kolejnym rozdziale zaprezentowano równania dynamiki statku powietrznego oraz dość szczegółowo omówiono zjawiska fizyczne, które zachodzą w uszkodzonych zespołach nośnych. W rozdziale czwartym omówiono zaprojektowane przez Autora systemy pomiarowe, zbudowane stanowiska badawcze, przygotowane oprogramowanie pokładowe, a także opracowane architektury i rozwiązania sprzętowo-programowe. W rozdziale piątym szczegółowo omówiono autorskie metody oparte o (i) analizę wibrometryczną, (ii) klasyfikację wzorców widmowych, (iii) sieć sensorową oraz metodę opartą o (iv) sygnały akustyczne. W omawianej części rozprawy każdy podrozdział kończy się podsumowaniem. W dwóch kolejnych rozdziałach szczegółowo omówiono ewaluację proponowanych rozwiązań oraz zamieszczono szczegółowe analizy wyników uzyskanych w oparciu o metody (i)-(iv). Każdy z podrozdziałów w tej części rozprawy kończy się podsumowaniem lub prezentacją wniosków. W końcowej części rozprawy Doktorant sformułował wnioski końcowe, wskazał na potencjał opracowanych i zweryfikowanych praktycznie rozwiązań, w tym także na oryginalne aspekty rozprawy. Na końcu prezentowane jest znaczenie rozprawy oraz dalsze prace.

Od strony formalnej rozprawa zredagowana jest poprawnie, z właściwą systematyką rozwiązywanych problemów naukowych. Nastęstwo rozdziałów jest właściwe, tytuły rozdziałów i podrozdziałów dają syntetyczny pogląd na zawartą w nich treść. Po podrozdziałach poświęconych prezentacji własnych osiągnięć zamieszczono podsumowania, co dodatkowo systematyzuje całość problematyki oraz logikę przekazu. Prezentacja problematyki pracy jest wyczerpująca. Autor precyzyjnie i poprawnie formuje wynikające z przeprowadzonych prac wnioski. Wnioski podsumowujące studium mają oparcie w proponowanych rozwiązaniach oraz uzyskanych wynikach empirycznych. Nowoczesny i bogaty warsztat badawczy oraz interdyscyplinarne i wielotematyczne spojrzenie na zagadnienie automatycznej diagnostyki uszkodzeń na potrzeby robotyki zaowocowały wartościowym studium. Zagadnienia podjęte w pracy są ważne nie tylko w aspekcie naukowym, ale przede wszystkim w aspekcie praktycznej realizacji systemów pokładowych do automatycznej diagnostyki.



3. Tematyka badań podjęta przez Doktoranta wyniknęła ze szczegółowej analizy ograniczeń istniejących metod diagnostycznych do automatycznej detekcji uszkodzeń rotorów wielowirnikowych robotów latających, a w szczególności wyzwań, którym to powinny sprostać nowoczesne i inteligentne jednostki latające. Istotne znaczenie dla recenzowanej rozprawy ma to, że liczba pokrewnych prac nie jest znacząca. Wynika to po części z wieloaspektowości podjętego zagadnienia, immanentnej interdyscyplinarności, a w szczególności z konieczności zbudowania zarówno stacjonarnych i pokładowych cyfrowych systemów pomiarowych oraz zaprojektowania i zaprogramowania współdziałających ze sobą modułów aby badania były w ogóle możliwe. W konsekwencji, jak zauważa Autor, w istniejących rozwiązaniach słabo odwzorowywane są warunki i stany systemu w odniesieniu do rzeczywistych lotów. Co więcej, w publikacjach prezentowane są głównie wyniki, które uzyskano poprzez diagnostykę uszkodzeń symulowanych, a zarazem analizach znaczących uszkodzeń, podczas gdy, jak podkreśla Autor, nawet utrata istotnej części wirnika niekoniecznie musi prowadzić do znaczącego spadku wartości ciągu generowanego przez uszkodzony napęd. Co więcej, metody diagnozujące realne uszkodzenia najczęściej ewaluowane są w lotach w zawisie, co z kolei skutkuje nieuwzględnianiem sygnałów wibracyjnych generowanych w dynamicznych fazach lotu i wysoce zmiennych trajektoriach lotów. Nie bez znaczenia jest też to, że w wielu pracach pomiary na potrzeby diagnostyki uszkodzeń wykonywane są przez wysokiej klasy systemy akwizycyjne, które z uwagi na specyfikę pomiarów pokładowych nie mogą być stosowane ze względów technicznych w lotach szerokiej gamy mniejszych gabarytowo UAV. Wspomniany kontekst pracy znacząco podnosi wagę uzyskanych wyników, a w szczególności umiejscawia opracowane rozwiązania. Niewątpliwym atutem pracy są także zarejestrowane zbiory danych, które rejestrowano w wielu lotach z uszkodzonymi wirnikami.

Pierwsza z opracowanych metod - metoda wibrometryczna oparta była na stosunkowo prostym wnioskowaniu na podstawie widmowej zawartości częstotliwości charakterystycznej dla uszkodzenia. Założono, że dzięki znajomości bezpośrednich pomiarów prędkości kątowej wirników lub w ostateczności w oparciu o estymaty prędkości możliwe będzie wydzielenie w widmie pasma zainteresowania, a następnie wnioskowanie na podstawie natężenia wibracji w paśmie wydzielonym tym sposobem. Zbudowano prototyp, opracowano algorytmy, a następnie zgromadzono dane pomiarowe, dokładając przy tym starań, aby nie tylko zrealizować określoną liczbę lotów, ale także aby były realizowane scenariusze adekwatne dla rzeczywistych misji, m.in. z agresywnymi manewrami, różnymi masami UAV oraz egzemplarzami wirników. Metodę przebadano eksperymentalnie, w tym także na zredukowanym zbiorze danych, analizując również wpływ czasu rejestracji sygnału. Aczkolwiek uzyskano dokładność klasyfikacji 92% - 94% w oparciu o pary prostych wskaźników diagnostycznych i tym samym małych nakładach obliczeniowych, to szerokości okna w granicy 500 ms skutkowały stosunkowo długim czasem działania metody. Druga metoda oparta jest o rozpoznawanie wzorców widmowych charakterystycznych dla rozpatrywanych uszkodzeń. W proponowanym podejściu diagnostyka oparta jest na pewnych charakterystycznych sygnaturach w dziedzinie częstotliwości. Diagnostyka uszkodzeń odbywa się poprzez rozpoznanie wzorców reprezentujących proporcje składowych częstotliwościowych w sygnałach pomiarowych. W konsekwencji metoda nie jest oparta na obarczone błędami pomiary lub estymaty prędkości kątowej wirników. Algorytm ewaluowano na danych zarejestrowanych na potrzeby ewaluacji metody wibrometrycznej. Pokazano eksperymentalnie, że proponowana metoda uzyskuje znacząco większą skuteczność detekcji uszkodzeń wirników



w porównaniu do algorytmu wibrometrycznego. Co więcej, pokazano eksperymentalnie, że proponowane podejście umożliwia także identyfikację typu uszkodzenia. Analizy wyników uzyskanych na podstawie próbek z okien o różnej długości wskazują, że proponowana metoda charakteryzuje się wysoką czułością nawet dla krótszych okien czasowych. Wyniki badań eksperymentalnych pokazały, że przy tej samej długości okna (500 ms) skuteczność detekcji wzrasta do 95%, a dla dłuższych okien czasowych skuteczność detekcji uszkodzeń dochodzi do 98%. Kolejna rozszerzona metoda diagnostyczna oparta została o klasyfikację wzorców widmowych z czterech wykonywanych jednocześnie pomiarów sygnałów wibracyjnych. Dzięki pomiarom sieci sensorów uzyskano możliwość zlokalizowania uszkodzonego wirnika. Istotną zmianą w algorytmie diagnostycznym jest modyfikacja parametrów sygnatury częstotliwościowej na podstawie widm sygnałów pomiarowych. Dzięki temu zabiegowi wyeliminowano nie tylko wyższe harmoniczne składowych charakterystycznych dla uszkodzenia, ale także szumy w górnym zakresie widma. Z kolei dzięki zastąpieniu klasyfikatora SVM przez wieloklasowy klasyfikator RF znacznie skrócono czas detekcji uszkodzeń przy nieznacznej poprawie skuteczności detekcji uszkodzeń. Zrealizowano szereg prac eksperymentalnych w których analizowano skrócenie czasu detekcji w zależności od rozmieszczenia sensorów, siłę dyskryminacyjną poszczególnych cech, identyfikację uszkodzeń wielokrotnych, a także identyfikację uszkodzeń w oparciu o proste sieci typu MLP. Wyniki badań eksperymentalnych wskazują, że skuteczność detekcji uszkodzeń w oparciu o omawianą metodę jest konkurencyjna w stosunku do skuteczności uzyskiwanych przez metody wspomniane wyżej. Autor jest także pomysłodawcą metody akustycznej, która wyróżnia się na tle innych rozwiązań diagnostycznych zdolnością do lokalizacji i identyfikacji typu uszkodzenia. Prace nad rozwojem metody realizowane były w wieloosobowym zespole. Doktorant wykonał oprzyrządowanie oraz opracował szczegółową koncepcję metody. Na potrzeby ewaluacji wykonano system pomiarowy oparty o macierz czterech miniaturowych mikrofonów MEMS. System ten umieszczono na pokładzie UAV. Do wnioskowania użyto sieci RNN (rekurencyjnej sieci neuronowej) operującej na cechach MFCC. Omawiana metoda jest metodą o znacznie większych wymaganiach obliczeniowych.

Pojęta w pracy problematyka jest ważka i istotna, nie tylko w aspekcie naukowym, ale przede wszystkim w aspekcie praktycznej realizacji systemów do automatycznej diagnostyki. Zaprezentowane wyniki badań oraz ich wnikliwa analiza potwierdziły prawdziwość stawianych w pracy hipotez. Należy docenić znaczący nakład pracy jaki wykonał Autor rozprawy oraz to, że proponowane rozwiązania są innowacyjne i oryginalne. Rozprawa wzbogaca naszą wiedzę i stanowi bardzo dobry materiał do dalszych prac. Autorskie propozycje rozwiązań wskazują na dobrą znajomość zagadnień związanych z przedmiotem rozprawy. Wyniki badań eksperymentalnych są spójne, przekonujące i należycie udokumentowane. Wyniki prac opublikowano w dziesięciu współautorskich publikacjach.

4. Poniższe uwagi, które mają polemiczny, a nie krytyczny charakter, odnoszą się do zagadnień, które mogłyby stanowić inspirację do dyskusji naukowej. Od strony poznawczej pracę wzbogaciłoby odniesienie się do możliwości i ograniczeń SFFT (Short-time Fourier Transform), WT i skalogramów (Wavelet Transform, scalograms), pseudotransformacji Wignera-Ville'a, w szczególności w odniesieniu do automatycznych metod diagnostyki technicznej. Interesujące byłoby także przeanalizowanie możliwości i ograniczeń technik wibro-akustycznych (vibro-acoustic), np. opartych o fuzję danych, sieci konwolucyjne 1D-CNN. Mając na względzie to, że

surowe sygnały w macierzy mikrofonowej były wstępnie filtrowane (rozdz. 5.4.3), dysertacji nie zaszkodziłoby przeanalizowanie technik filtracji szumów i innych niepożądanych sygnałów z akcelerometrów dwu-osioowych, wykorzystywanych w charakterze „vibration-sensors”, w tym także innych niepożądanych zjawisk, np. związanymi z rezonansami (resonance oscillations). Z uwagi na to, że sieci neuronowe mogą uzyskiwać konkurencyjne wyniki w zadaniach klasyfikacji, wartościowym uzupełnieniem pracy byłoby odniesienie wyników uzyskiwanych przez RF/SVM do wyników uzyskiwanych przez sieci neuronowe inne niż MLP, w tym także w kontekście implementacji na systemach wbudowanych.

Powyższe uwagi mają przede wszystkim charakter dyskusyjny i nie umniejszają w najmniejszym stopniu wartości pracy, która stanowi oryginalny wkład w dziedzinę robotyki i inteligencji maszynowej.

5. Przeważająca mi do recenzji rozprawa doktorska jest wartościowym opracowaniem naukowym, które wnosi solidną wiedzę oraz know-how w zakresie projektowania i realizacji systemów do automatycznej diagnostyki uszkodzeń wirników nośnych robotów latających. Rozprawa potwierdza znaczącą wiedzę Doktoranta w obszarze robotyki oraz szeroko rozumianej diagnostyki, umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a także duże zdolności w zakresie projektowania, realizacji i ewaluacji złożonych systemów cyfrowych. Podjęta tematyka badawcza jest aktualna i ma znaczący potencjał aplikacyjny. W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana rozprawa mgr. inż. Adama Bondyry spełnia wszystkie wymagania ustawowe i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim. Stwierdzam niniejszym, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia kryteria określone w art. 13 ust. 1 Ustawy. Wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. inż. Adama Bondyry do kolejnych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika. Ponadto, wysoki poziom merytoryczny i potencjał praktyczny zaprojektowanych i zrealizowanych rozwiązań, które poparto publikacją w czasopiśmie ze znaczącą liczbą punktów (140 pkt.) na liście czasopism punktowanych MEiN, są przesłanką do wnioskowania do Rady Dyscypliny Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki Politechniki Poznańskiej o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Adama Bondyry.

Bondyry Adam