

Dr hab. inż. Krzysztof Pietrusewicz, prof. ZUT

Szczecin, 21.02.2023 r.

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Wydział Elektryczny

Katedra Automatyki i Robotyki

Al. Piastów 17, 70 – 310 Szczecin

krzysztof.pietrusewicz@zut.edu.pl



**RECENZJA**

**Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adama Bondyry**

PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY  
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika  
i Technologie Kosmiczne

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

## 1 Wstęp i podstawa prawna

Recenzowana rozprawa porusza istotne, zarówno z naukowego jak i praktycznego oraz aplikacyjnego punktu widzenia, zagadnienia diagnostyki uszkodzeń wirników nośnych robotów latających a tym samym bezpieczeństwa eksploatacji bezzałogowych systemów latających.

Recenzja została sporządzona na prośbę rady dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika wyrażoną w piśmie DR-012/91/2022 z dnia 4 października 2022 roku oraz Uchwale nr 41/2021-2022 tej samej rady dyscypliny z dnia 28 września 2022 roku.

Przewód doktorski mgr. inż. Adama Bondyry (wszczęty 22.01.2019 r. w dziedzinie: nauki techniczne, w dyscyplinie naukowej: automatyka i robotyka), procedowany jest wg Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r. poz. 261) oraz Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789).

## 2 Ocena formalna pracy

Praca doktorska pt. „Automatyczna diagnostyka uszkodzeń wirników nośnych robota latającego” obejmuje 165 stron. Składa się z 8 zasadniczych rozdziałów (w tym wstępu oraz podsumowania) oraz Bibliografii z wykazem 123 prac i jednej strony WWW. Praca jest uzupełniona streszczeniem w języku polskim i angielskim, przydatnym dla czytelnika wykazem skrótów i oznaczeń, spisem rysunków, spisem tabel. Praca jest napisana w języku polskim i zorganizowana jak poniżej:

1. Rozdział 1. Wstęp – wprowadzenie do problematyki rozprawy; przybliżenie czytelnikowi znaczenia badanego problemu; określenie celu pracy, genezy podjęcia problematyki badawczej oraz przedstawienie hipotez badawczych, składających się na tezę pracy;
2. Rozdział 2. Stan wiedzy dotyczącej diagnostyki uszkodzeń rotorów UAV – przegląd bieżących osiągnięć nauki i techniki dotyczących problematyki rozprawy; stan wiedzy w szerszym kontekście, dotyczącym problematyki diagnostyki BSP; wskazanie obecnych obszarów poszukiwań rozwiązań diagnostycznych dla różnych klas uszkodzeń elementów wykonawczych;
3. Rozdział 3. Cechy specyficzne obiektu diagnostyki – opis aspektów technicznych rozpatrywanego w rozprawie zagadnienia; przedstawienie modelu wielowirnikowego

W.



- UAV w tym równań dynamiki obiektu badań; omówienie zjawisk fizycznych towarzyszących pracy uszkodzonych wirników; obserwacje empiryczne autora;
4. Rozdział 4. Implementacja i prace techniczne dotyczące rozwiązań diagnostycznych – szereg opracowanych przez autora rozwiązań technicznych, stanowisk badawczych i systemów kontrolno-pomiarowych; przedstawienie platformy eksperymentalnej Falcon; omówienie budowy sieci sensorowej złożonej z akcelerometrów wykonanych w technologii MEMS; omówienie budowy macierzy mikrofonów; przedstawienie stanowiska hamowni napędów śmigłowych oraz urządzenia do realizacji eksperymentu „lotu na uwięzi”;
  5. Rozdział 5. Metody diagnostyczne – omówienie zaproponowanych przez autora i rozwijanych w ramach recenzowanej pracy metod i algorytmów diagnostycznych; omówienie metody analizy wibrometrycznej; omówienie metody klasyfikacji wzorców widmowych; omówienie metody, wykorzystującej sieć akcelerometrów; omówienie metody diagnostycznej bazującej na rejestracji sygnałów ciśnienia akustycznego;
  6. Rozdział 6. Eksperymenty walidacyjne – opis serii przeprowadzonych eksperymentów walidacyjnych; omówienie rozpatrywanych typów i klas uszkodzeń; przedstawienie metodyki prowadzenia badań oraz liczebności zgromadzonych zbiorów danych;
  7. Rozdział 7. Analiza uzyskanych rezultatów – omówienie uzyskanych w toku badań rezultatów; prezentacja wyników dla każdej z proponowanych metod; bardzo wnikliwe porównanie możliwości i skuteczności poszczególnych metod i algorytmów diagnostycznych;
  8. Rozdział 8. Podsumowanie – wnioski końcowe wraz z oceną stopnia realizacji przyjętych dla rozprawy celów; podkreślenie oryginalności prac autora rozprawy; wskazanie dalszych kierunków badań.

Pozycje literaturowe, w których powstaniu autor rozprawy brał udział:

1. [12] A. Bondyra, S. Gardecki, P. Gąsior i W. Giernacki. „Performance of coaxial propulsion in design of multi-rotor UAVs”. W: International Conference on Automation. 2016, s. 523–531 (cyt. na s. 3, 24, 47).
2. [84] A. Bondyra, S. Gardecki, P. Gąsior i A. Kasiński. “Falcon: A compact multirotor flying platform with high load capability”. W: Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques. Springer, 2015, s. 35–44 (cyt. na s. 44).
3. [85] A. Bondyra, S. Gardecki i P. Gąsior. „A distributed control system for multirotor aerial platforms”. W: Measurement Automation Monitoring 61 (2015) (cyt. na s. 44, 46).
4. [87] P. Gąsior, A. Bondyra i S. Gardecki. „Comparison of different methods of flight data logging used in multirotor UAVs”. W: Measurement Automation Monitoring 63 (2017) (cyt. na s. 51).
5. [89] P. Aszkowski, K. Błoszyk, A. Bondyra, P. Gąsior i W. Giernacki. „UAV propulsion analysis system with reconfigurable controller feature”. W: Measurement Automation Monitoring 63 (2017) (cyt. na s. 61).
6. [90] A. Bondyra, P. Gąsior i S. Gardecki. „Experimental test bench for multirotor UAVs”. W: International Conference Automation. Springer. 2017, s. 330–338 (cyt. na s. 62).
7. [97] A. Bondyra, P. Gąsior, S. Gardecki i A. J. Kasiński. „Development of the Sensory Network for the Vibration-based Fault Detection and Isolation in the Multirotor UAV Propulsion System”. W: International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO). 2018, s. 112–119 (cyt. na s. 81, 83, 85, 86, 100, 152).
8. [103] A. Bondyra, M. Kołodziejczak, R. Kulikowski i W. Giernacki. „An Acoustic Fault Detection and Isolation System for Multirotor UAV”. W: Energies 15.11 (2022) (cyt. na s. 91, 93, 94, 105, 141, 142, 152).
9. [111] R. Puchalski, A. Bondyra, W. Giernacki i Y. Zhang. „Actuator fault detection and isolation system for multirotor unmanned aerial vehicles”. W: 2022 26<sup>th</sup> International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR) (artykuł przyjęty do publikacji). 2022 (cyt. na s. 100, 136, 137, 152).



10. [113] A. Bondyra, P. Gąsior, S. Gardecki i A. Kasiński. „Fault diagnosis and condition monitoring of UAV rotor using signal processing”. W: 2017 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA). 2017, s. 233–238 (cyt. na s. 100, 102, 152).

Spośród 10 współautorskich prac, cytowanych w recenzowanej rozprawie, najważniejszymi z perspektywy celu oraz tezy dysertacji są moim zdaniem prace: [97], [103], [111] oraz [113]. Jest w mojej ocenie zgodność ze zdaniem doktoranta, wyrażonym na stronie 152.

Uwagi na temat poprawności językowej i redakcyjnej rozprawy:

1. Generalnie praca napisana starannie, bez błędów językowych; opisy bardzo szczegółowe, momentami przytłaczające liczbą detali i pojęć;
2. W całej pracy autor nadużywa słowa „opierać” w różnych odmianach: oparte, oparty, oparta, opartej, opartego; w całej pracy ponad 150 razy; znacznie lepiej pod względem językowym byłoby i z korzyścią dla pracy, gdyby autor korzystał z synonimów: bazować na, wykorzystywać w/do, używać w/do;
3. Liczne zawieszki (tzw. sieroty „a, i, o, u, w, z”) w całej pracy;
4. Liczne „wdowy” (przykładowo strony: III, V, VI, 4, 5, 6, itd.);
5. Cytowanie not technicznych komponentów sprzętowych w przypisach dolnych nieprawidłowe (przykładowo strony: 42, 43, 48, 53, 54, 57, 58, 61, 104); w mojej ocenie powinny być cytowane analogicznie do stron WWW z Bibliografii; w przyjętym rozwiązaniu technicznym składu pracy nie nastęczałoby to większych trudności autorowi; cytowanie w przypisach dolnych charakterystyczne jest dla prac z obszaru nauk społecznych, nie zaś technicznych;
6. Brak konsekwencji w użyciu określenia UAV / BSP;
7. Numerowanie rozdziału „Wstęp” jest moim zdaniem poprawne;
8. Struktura pracy bardzo logiczna; autor dokonał interesującego zabiegu w zakresie przyjęcia kolejności rozdziałów 4 (Implementacja i prace techniczne dotyczące rozwiązań diagnostycznych) i 5 (Metody diagnostyczne); na pierwszy rzut oka jest to kolejność odwrotna od typowego liniowego sposobu opisu zagadnień technicznych, jednakże autor w umiejętny sposób w rozdziale 4 przedstawia wszystkie aspekty implementacji oraz ograniczenia technologiczne, by czytelnik zapoznając się z metodami diagnostycznymi w rozdziale 4 miał możliwość docenienia wysokiego nakładu pracy autora oraz trudnych warunków, w jakich porusza się proponując kolejne modyfikacje metod diagnostycznych; postrzegam to jako bardzo pozytywne i warte podkreślenia jako oryginalne i znacząco podnoszące wartość redakcyjną pracy;
9. Rozdziały 2 i 3 pozostawiają lekki niedosyt u czytelnika: w rozdziale 2 brakuje według mnie zdania komentarza o tym, że niniejsza praca i opracowane w niej algorytmy nie posiadają wad algorytmów i podejść, opisywanych w przywołanych źródłach literaturowych (autor pozostawia czytelnika z koniecznością samodzielnego zdecydowania, czy to, o czym pisze to dobre czy złe rozwiązanie); w rozdziale 3 brakuje moim zdaniem domknięcia, wiążącego obserwacje autora z postawionymi hipotezami badawczymi;
10. Cel, zakres oraz teza pracy (na którą składa się szereg hipotez) zostały zaprezentowane w jasny, nie pozostawiający wątpliwości sposób.



### 3 Ocena merytoryczna pracy

#### 3.1 Istotność zagadnienia

Tematyka niniejszej dysertacji związana jest z opracowaniem oraz eksperymentalną weryfikacją i walidacją czterech metod diagnostycznych, umożliwiających wczesną i realizowaną automatycznie detekcją uszkodzeń elementów wykonawczych (rotorów) wielowirnikowych jednostek latających. Zaproponowano nową metodę bazującą na jednoczesnym pomiarze wielu sygnałów wibroakustycznych, rejestrowanych w trakcie lotu. Opracowano oryginalne metody detekcji. Trzy z opracowanych w ramach recenzowanej rozprawy metod wykorzystują analizę widma wibracji mierzonych z zastosowaniem czujników inercyjnych. Algorytm czwarty czerpie z cepstralnej analizy sygnału ciśnienia akustycznego. Tego typu podejście, stosowane jest w literaturze do różnego rodzaju aplikacji, związanych z przetwarzaniem mowy ludzkiej czy coraz częściej wibroakustyczną diagnostyką maszyn. W przypadku opiniowanej tutaj pracy autor zastosował umiejętnie cepstralną analizę sygnałów ciśnienia akustycznego rejestrowanego za pomocą macierzy mikrofonów, zamontowanej na konstrukcji wielowirnikowego BSP.

Dzięki kombinacji zaawansowanego przetwarzania sygnałów w dziedzinie czasu i częstotliwości z dokładnie opisanymi w pracy technikami uczenia maszynowego doktorant łączy w swojej pracy dwa podejścia do wykrywania uszkodzeń BSP – bazującego na danych i wykorzystującego modele. Autor skupia się w swojej pracy na dwóch najistotniejszych jego zdaniem typach uszkodzeń wirników: złamaniem płata oraz deformacją krawędzi płata.

Zagadnienia poruszane w pracy są niezwykle istotne z perspektywy eksploatacji bezałogowych systemów latających, zarówno pod względem bezpieczeństwa jak i całościowego kosztu posiadania/użytkowania systemu.

#### 3.2 Zawartość merytoryczna pracy

Najważniejszym naukowo rozdziałem pracy jest z pewnością rozdział 5. Na nim chciałbym się skupić podczas mojej opinii. Autor przedstawia w nim cztery porównywane w ramach rozprawy metody diagnostyczne. Rozdział ten jest również w mojej ocenie, poza niezaprzeczalnie wysokiej jakości warsztatem badawczym, omówionym w ramach rozdziału 3 i 4, najważniejszym osiągnięciem rozprawy.

Pierwsza z metod, tzw. analiza wibrometryczna, wskazana jest przez doktoranta jako najstabsza pod względem skuteczności detekcji. Na rysunku 5.5, zamieszczonym na końcu rozdziału 5.1, przedstawiono schemat blokowy tejże metody diagnostycznej. Autor rozprawy wskazuje problem techniczny w zastosowaniu metody, jakim jest brak dostępności pomiarowej sygnałów prędkości obrotowej poszczególnych wirników. Doktorant proponuje zastosowanie modelu wielomianowego, jednego dla wszystkich jednostek napędowych (rysunek 5.1, wzór 5.1). W mojej ocenie wadą modelu (5.1) jest brak uwzględnienia zjawisk dynamicznych, zachodzących w wirniku. Jednocześnie użycie funkcji o tych samych wartościach parametrów (współczynników dopasowania wielomianu dla funkcji prędkości wirnika, zależnej od napięcia i wypełnienia sygnału sterującego w warunkach ustalonych) wprowadza dodatkowy błąd w opisywanej metodzie. Autor sam zwraca na to uwagę na stronie 70 rozprawy. Wydaje się jednak, że w przypadku tej metody użycie nawet bardzo dokładnego modelu nieliniowego każdego z wirników nie przyniosłoby dużej poprawy, a skutkowałoby znacznym zwiększeniem niezbędnej do zastosowania mocy obliczeniowej. Podsumowując, pierwsza z opisywanych metod jest najmniej obiecującą.



Druga z prezentowanych i badanych w pracy metod to klasyfikacja wzorców widmowych. Jest to rozwinięcie metody wibrometrycznej, jednakże wyeliminowano tutaj wadę, jaką była konieczność stosowania modelu prędkości obrotowej wirnika. Jest to bardzo ważna zaleta modyfikacji. Metoda klasyfikacji wzorców widmowych pozwala skutecznie przewidywać typ uszkodzenia.

W kolejnej, trzeciej metodzie, autor sięga po metodę diagnostyczną, dzięki której dodatkowo możliwe staje się zlokalizowanie miejsca wystąpienia uszkodzenia. Metoda wykorzystuje akcelerometry zamontowane bezpośrednio przy każdej z czterech jednostek napędowych. Metoda diagnostyczna z zastosowaniem sieci czujników jest zdaniem doktoranta najdokładniejsza ze wszystkich prezentowanych w pracy. Zastosowano tutaj inne podejście do uczenia maszynowego aniżeli w metodach analizy wibrometrycznej oraz klasyfikacji wzorców widmowych.

Ostatnia z prezentowanych w pracy metod diagnostycznych jest istotnie różna od pozostałych. Nie są tutaj analizowane sygnały przyspieszeń tylko sygnały akustyczne (ciśnienia akustycznego). Metoda jest dużo bardziej złożona zarówno pod względem wstępnego przetwarzania sygnałów jak i samego algorytmu diagnostycznego. Klasyfikacja uszkodzenia bazuje na sieci neuronowej typu LSTM.

Oryginalne osiągnięcie doktoranta w przypadku tej metody (badanej przez wieloosobowy zespół) obejmuje propozycję koncepcji metody diagnostycznej (strona 89 rozprawy), w tym wykorzystania sygnałów ciśnienia akustycznego do wykrywania uszkodzeń wirników, projekt i wykonanie oprzyrządowania, zaprojektowanie eksperymentów walidacyjnych oraz wstępną analizę uzyskanych wyników. Sam klasyfikator uszkodzeń jest osiągnięciem naukowym współpracowników doktoranta. Opis metody diagnostycznej oraz sposób jej implementacji są przedstawione tak, by jasno wytyczyć granicę oryginalności osiągnięcia naukowego doktoranta.

Rozdziały 6 oraz 7 stanowią opis przeprowadzonych w pracy eksperymentów oraz komentarz do uzyskanych wyników. Rozdziały te są drobiazgowo i w bardzo precyzyjny sposób wskazują na rozmaite aspekty uzyskanych wyników. Czytelnik jest zapoznawany z metodyką wszystkich eksperymentów walidacyjnych niemalże w szkoleniowy sposób. Jednocześnie (strona 104) autor dokonał publikacji opisywanego w rozprawie zbioru danych w ramach mechanizmu otwartego dostępu. W ten sposób przyczynia się do upowszechniania wyników swoich prac badawczych. Jest to w mojej ocenie ważny „produkt” rozprawy.

W Podsumowaniu (rozdział 8) autor, poza wnioskami, w dojrzały sposób wskazuje poziom realizacji przyjętych dla recenzowanej rozprawy celów. Nie ma wątpliwości, że doktorant osiągnął je w całości. Dodatkowo potwierdza oryginalność swoich prac na tle aktualnego stanu wiedzy. Pracę zamyka wskazanie kierunków dalszych badań. Są one w mojej ocenie naturalnym rozwinięciem osiągnięć recenzowanej rozprawy. Jestem również przekonany, że autor podczas redakcji pracy zgromadził dodatkowe wnioski związanej z wybranymi aspektami implementacji rozwijanych od lat algorytmów w nowych wersjach swojego warsztatu badawczego.

### 3.3 Uwagi dyskusyjne

1. W metodzie 1 (rozdział 5.1) zastosowano pojedynczy model wielomianowy dla funkcji wiążącej prędkość obrotową wszystkich czterech wirników z sygnałem wypełnienia (wartość sygnału sterującego) oraz napięciem zasilania. Dlaczego wybrano podejście, w którym ten sam model zastosowano dla wszystkich czterech wirników;



2. W metodzie diagnostycznej 1 oraz 2 zastosowano klasyfikator SVM. W metodzie 3 zastosowano klasyfikator RF. Proszę wyjaśnić powody stosowania różnych algorytmów uczenia maszynowego w porównywanych metodach;
3. W metodzie 2 i 3 zastosowano podczas pobierania danych okno Hamminga, w metodzie 4 zastosowano funkcję okna Kaisera. Proszę wyjaśnić powody stosowania różnych funkcji w porównywanych metodach;
4. Proszę o komentarz wyboru kolejności rozdziałów 4 i 5. Swoje pozytywne zdanie na ten temat wyraziłem już w recenzji. Proszę o komentarz.

### 3.4 Ogólna ocena merytoryczna pracy

W mojej ocenie przedstawiona mi do recenzji praca jest naukowo kompletna. Potwierdzeniem tego jest występowanie w rozprawie:

1. Odniesień do literatury przedmiotu badań,
2. Modelu wielowirnikowego BSP w zakresie pozwalającym analizować zjawiska towarzyszące pracy uszkodzonych wirników,
3. Projektu i konstrukcji szeregu autorskich rozwiązań związanych z budową stanowiska laboratoryjnego,
4. Rejestracji rzeczywistych danych pomiarowych z wykorzystaniem zaprojektowanego i zbudowanego stanowiska laboratoryjnego,
5. Porównania w sposób ewolucyjny kolejnych metod i algorytmów diagnostycznych ze wskazaniem istotnych różnic, podnoszących jakość detekcji diagnozowanych uszkodzeń.

Poszukiwania naukowe doktoranta zawarte są zasadniczo w rozdziałach od 4 do 7. Zaowocowały autorskimi rozwiązaniami wielu aspektów badawczych, które w mojej ocenie stanowią ważny wkład w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika. Do najważniejszych należą:

1. Budowa autorskiego stanowiska laboratoryjnego, na które poza systemami pomiarowymi związanymi z implementowanymi metodami składają się również rozwiązania do identyfikacji parametrów (hamownia) oraz podsystem służący do prowadzenia eksperymentów podczas lotu „na uwięzi”,
2. Implementacja opisywanych metod w systemach kontrolno-pomiarowych BSP,
3. Zaproponowanie metody diagnostycznej uszkodzeń wirników BSP z zastosowaniem wielu akcelerometrów oraz metody z zastosowaniem jednoczesnego pomiaru wielu sygnałów ciśnienia akustycznego.

Zaprezentowane badania mają charakter rozwojowy, zmierzający w kierunku opracowania metod diagnostycznych integrowanych w ramach jednego systemu kontrolno-pomiarowego BSP, zgodnie z przywołaną przez autora filozofią projektowania SWAP.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi według mnie oryginalne rozwiązanie zdefiniowanego na wstępie problemu naukowego. W dużej mierze jest również oryginalnym rozwiązaniem tego problemu z zastosowaniem szeregu autorskich opracowań projektowych, konstrukcyjnych i technologicznych. Zaprezentowane wyniki badań wykazują ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika zaś poziom precyzji opisu stawianych w pracy a następnie udowodnianych hipotez badawczych dowodzą umiejętności doktoranta zarówno do zespołowego jak i (co ważniejsze) samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Uważam, że doktorant dysponuje teoretycznym oraz praktycznym warształem badawczym, potrafi zaplanować eksperyment naukowy oraz posiada umiejętności publikowania wyników badań, czego dowodzą prezentowane i cytowane w rozprawie prace. Choć pewien niedosyt budzi brak publikacji samodzielnych doktoranta, to dokonania opisane w rozprawie jasno wytyczają wkład doktoranta w dyscyplinę naukową.

#### **4 Wniosek końcowy**

Po zapoznaniu się z pracą doktorską pt.: „Automatyczna diagnostyka uszkodzeń wirników nośnych robota latającego” oraz na podstawie dokumentów Dz. U. z 2018 r. poz. 261 i Dz. U. z 2017 r. poz. 1789 stwierdzam, że:

#### **przedstawiona rozprawa spełnia**

wymagania określone w przedmiotowych dokumentach i w związku z powyższym

#### **wnioskuje o przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie**

mgr. inż. Adama Bondyry do publicznej obrony.

*Przetwórcu.*