

płk dr hab. inż. Krzysztof Dragan, prof. ITWL

Warszawa, 30.08.2021 r.

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

ul. Ks. Bolesława 6

01-494 Warszawa

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Pawełczyka, n.t. „Aviation Engineering Applications of Artificial Intelligence for UAV Detection and Gas Turbine Predictive Maintenance”

Podstawa:

Recenzja została opracowana na podstawie zlecenia Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej - prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika - pismo nr RNDIM-521/4/2021 z dnia 9 czerwca 2021 r.

1. Ogólna i formalna charakterystyka pracy

W przygotowanej pracy doktorskiej doktorant przedstawił podejście do wykorzystania coraz istotniejszego obszaru w szczególności w lotnictwie a mianowicie metod klasyfikacji i separacji danych na potrzeby wnioskowania. Autor podjął się tematyki wykorzystania różnych rodzajów sieci neuronowych oraz algorytmów detekcji i klasyfikacji obiektów na podstawie sygnałów w tym sygnałów dwuwymiarowych pochodzących ze strumieni obrazowych.

Prowadzone w pracy badania dotyczyły dwóch obszarów użytecznych zastosowań oraz szerokiego spektrum badania i oceny narzędzi analizy dużych zbiorów danych. Pierwszym poruszonym przez doktoranta obszarem zainteresowania był problem wykrywania bezzałogowych aparatów latających o konfiguracji wielowirnikowej. Z uwagi na lawinowy wzrost zastosowań takich urządzeń zarówno w regulowanej przestrzeni powietrznej jak i użytkowaniu amatorskim powstaje konieczność budowy odpowiednich systemów wczesnego ostrzegania przed obecnością takiego urządzenia w szczególności w pobliżu obszarów strzeżonych. Autor przedstawia w pracy przykłady, iż z uwagi na brak odpowiedniej świadomości operatorów takich urządzeń, stwarzają one zagrożenia dla transportu lotniczego (generując ryzyko

katastrofy oraz znaczące koszty wyłączenia lotniska i zmiany statusu połączeń lotniczych). Doktorant podjął się tematyki ciekawego z utilitarnego punktu widzenia problemu do rozwiązania - detekcji i wykrywania takiego obiektu za pomocą analizy zdjęć lub strumieni obrazów rejestrowanych np. za pomocą infrastruktury przemysłowej. Przeprowadzone przez autora badania wykorzystują szereg metod klasyfikacyjnych zbiorów danych takich jak: zbiór cech Haar'a (kaskady Haar'a), konwolucyjne sieci neuronowe i metody uczenia głębokiego.

Drugim analitycznym zagadnieniem o znaczącym stopniu utilitarności jakiego podjął się doktorant jest wykorzystanie metod uczenia maszynowego we wsparciu eksploatacji wykorzystującej metody predykcyjne. Takie podejście coraz częściej wykorzystywane jest w architekturze rozwiązań dla przemysłu 4.0 oraz internetu rzeczy. Zagadnieniem tym jest wykorzystanie sygnałów z czujników rejestrujących parametry pracy turbin gazowych. Rejestracja kluczowych parametrów pracy takich urządzeń wraz z korelacją z warunkami pracy i czynnikami zewnętrznymi (w tym z historią obsługi) może pozwalać na eksploatację urządzenia wg. stanu technicznego w tym na zastosowanie metod predykcji wystąpienia stanów awaryjnych lub anomalnych wymuszających działania prewencyjne. Takie podejście pozwala nie tylko optymalizować koszty eksploatacji ale również parametry pracy zespołu np. dla konkretnych wymuszeń, co może przełożyć się na dłuższe czasy między przeglądami. Takie podejście coraz częściej wykorzystuje się nie tylko w przemyśle ale również w transporcie czy zastosowaniach infrastruktury strategicznej i krytycznej. Autor szczegółowo przeanalizował i ocenił wydajność poszczególnych metod regresji i klasyfikacji posługując się kryteriami wskaźników.

Doktorant podjął się bardzo ciekawej tematyki wykorzystania metod sztucznej inteligencji, która ma coraz istotniejsze zastosowanie nie tylko w lotnictwie ale również w szerokim spektrum zastosowań badawczych i komercyjnych. Przedstawiona metodologia podejścia kryterialnego wyboru metod uczenia w oparciu o wskaźniki efektywności może mieć zastosowanie również w innych obszarach eksploracji danych co świadczy o wysokim walorze użytkowym przedstawionej pracy.

Przedstawiona przez autora na 195 stronach maszynopisu praca, poza wstępem, streszczeniem w języku polskim i w języku angielskim oraz wykazem rysunków, zawiera:

- **Wstęp** w którym doktorant przedstawia motywację jaką kierował się podczas przygotowania swojej pracy. Autor nakreśla cel pracy przedstawiając wykorzystanie metod uczenia maszynowego i sztucznej inteligencji w zastosowaniach pozwalających na detekcję aparatów bezzałogowych oraz wsparciu eksploatacji

turbin gazowych w zakresie diagnostyki predykcyjnej. Problem wykrywania obiektów bezzałogowych jest zagadnieniem wykorzystywanym w coraz intensywniej prowadzonych pracach badawczych ze względu na gwałtowny wzrost występowania tego typu aparatów w przestrzeni publicznej. Autor przedstawia problematykę zdarzeń powodowanych przez naruszenia takimi obiektami przestrzeni publicznej. Istniejące systemy detekcji i przeciwdziałania takim naruszeniom wymagają wielomodowej analizy połączonej z fuzją danych i specjalistycznym wyposażeniem. Autor proponuje rozwiązanie polegające na stworzeniu modelu przetwarzającego wyłącznie obraz z nisko kosztowych systemów rejestracji danych obrazowych w celu wdrożenia go jako elementu wczesnego ostrzegania przed takimi zdarzeniami. Praca zawiera również drugie studium przypadku związane z zawodową pracą doktoranta w zakresie eksploatacji turbin gazowych. W pracy opisany został problem turbiny gazowej LM2500, a w szczególności określania ciśnienia łożyska za pomocą tzw. „wirtualnego” czujnika będącego korelacyjnym kolektorem wskazań na podstawie pomiarów z czujników rzeczywistych. Autor przedstawia analizę i wybór metod regresji i klasyfikacji do zastosowania jako sygnał wyjściowy modelu uczenia maszynowego w oparciu o wskazania czujników rzeczywistych. W tym rozdziale autor szczegółowo definiuje zakres badawczy swojej dysertacji oraz przedstawia jej cel badawczy oraz szereg celi szczegółowych o istotnym znaczeniu użytkowym dla aplikacji oceny sygnałów wykorzystujących metody sztucznej inteligencji. Finalnie doktorant stawia w niniejszym rozdziale tezę która podlega procesowi dowodowemu w dalszej części pracy.

- **Rozdział drugi** w którym doktorant przedstawia szczegółową analizę literaturową obejmującą opis problematyki wykorzystania metod sztucznej inteligencji oraz segmentacji i klasyfikacji danych obrazowych w celu identyfikacji określonych obiektów. Rozdział ten systematyzuje i klasyfikuje stosowane metody i architektury sztucznych sieci neuronowych oraz metod uczenia maszynowego w odniesieniu do możliwych zastosowań. Autor przeprowadza analizę możliwych rozwiązań w celu uzasadnienia wyboru określonych metod analizy zbiorów danych w postaci obrazów w tym metod głębokiego uczenia. Jednym z istotnych wyzwań dla tych metod jest również proces pozyskania odpowiednio dużych zbiorów danych w celu przeprowadzenia efektywnego procesu szkolenia sieci do określonych zadań uzyskując maksymalną możliwą precyzję dla procesu decyzyjnego. W dalszej części rozdziału autor przeprowadza szczegółową analizę rozwiązań i opisuje model propagacyjny sygnału i architekturę rozwiązań sieci dla proponowanych w pracy zastosowań. Ten element pracy wskazuje na bardzo dobrą znajomość

„warsztatu” badawczego wykorzystanego w dalszej części pracy przez doktoranta. Analiza rozwiązań, znajomość architektury sieci oraz ograniczeń i zalet wynikających z ich zastosowań do określonego w pracy kierunku badań pozwoli w dalszej części pracy przeprowadzić określone działania optymalizacyjne, które nie byłyby możliwe bez uzyskania wiedzy przedstawionej w niniejszym rozdziale. Autor zauważa również konieczność stosowania odpowiednich rozwiązań sprzętowych zapewniających ciągłość i szybkość przeprowadzonych obliczeń w szczególności z uwagi na konieczność stosowania w proponowanych przez niego rozwiązaniach urządzeń brzegowych. Doktorant przedstawia możliwe narzędzia programistyczne i wskazuje również na ograniczenia związane z przetwarzaniem danych z uwagi na transmisję danych pomiędzy bankiem danych a procesorem. Autor przedstawia w sposób szczegółowy proces aktywacji sygnałowej w sieci oraz przebieg procesu uczenia wraz z podziałem na etapy. Autor omawia również schemat podziału danych w szczególności z uwagi na proces przygotowawczy do uczenia. W dalszej części pracy autor przedstawia metodologię stosowaną do numerycznej analizy danych obrazowych z uwzględnieniem normalizacji i filtracji tych danych - z uwagi na przygotowanie do procesu klasyfikacji. Doktorant przedstawia również proces tworzenia i wykorzystania tzw. kaskad Haar'a w zastosowaniu do wykrywania obiektów bezzałogowych. Proces ten wymaga przygotowania szeregu specyficznych cech wrażliwych na wykrycie obiektów o określonych charakterystykach geometrycznych. Ta wrażliwość została przez doktoranta dostrzeżona co skłoniło go do przeprowadzenia dalszych badań wykorzystujących architektury sieci konwolucyjnych i uczenia głębokiego. Finalnie autor przedstawia metryki oceny dokładności i precyzji uzyskanych wyników - które zostaną wykorzystane podczas dyskusji dotyczącej wyboru finalnego rozwiązania dedykowanego zastosowaniom przedstawionym w pracy.

- **Rozdział trzeci** przedstawia problematykę dotyczącą uzyskania odpowiedniego zbioru testowego pozwalającego na przeprowadzenie procesu uczenia a następnie weryfikacji. Istotnym elementem takiego procesu jest uzyskanie reprezentatywnych danych pozwalających na jego właściwie przeprowadzenie, co uzyskiwane jest poprzez odpowiednie opisywanie zbiorów dla takiego procesu. Jednym z istotnych trudnień takiego procesu co zostało zauważone przez autora na etapie przygotowania danych jest pozyskanie odpowiednich i wiarygodnych danych. W tym celu autor przygotował zbiór danych dla procesu uczenia i walidacji który zawiera 51,446 (zbiór uczący) i 5,375 (zbiór testowy) zdjęć. Ponadto proces opisu takich danych - określany jako etykietowanie jest procesem czasochłonnym wymagającym przeglądania poszczególnych danych obrazowych. Autor

zapropował, przetestował i zastosował swoją metodę półautomatycznego etykietowania zdjęć, która pozwoliła na znaczące przyspieszenie procesu przygotowania danych oraz może być wykorzystana w zagadnieniach bliźniaczych. W celu uzyskania wiarygodności dane te zostały jeszcze zweryfikowane przez autora co świadczy o zrozumieniu prowadzonego procesu badawczego i podwyższa precyzję uzyskanych danych. Ponadto proces ten wymógł od doktoranta znaczącego zaangażowania czasowego w realizację pracy. Zbiór danych różni się również wielkością, co może również wpływać na precyzję procesu klasyfikacji w szczególności z uwagi na rozmiary klasyfikowanych obiektów. Autor nie wspomina w tym rozdziale o specyfice i wielkości danych wykorzystanych przez niego w aspekcie eksploatacji turbin gazowych.

- **Rozdział czwarty** w którym doktorant przedstawia wyniki uzyskane w trakcie oceny możliwości wykrywania aparatów bezzałogowych z wykorzystaniem stosowanych przez niego architektur sieci i metod klasyfikacji. Autor dokonuje porównania metod algorytmów detekcji z sieciami neuronowymi w tym metodami uczenia głębokiego. W celu porównania metod głębokiego uczenia maszynowego z klasycznymi algorytmami wnioskującymi przygotowany został klasyfikator Haar'a dla którego uzyskał dokładność na poziomie 55.4% (miara F1=28.6%). Wykorzystanie modelu głębokich sieci neuronowych, a w szczególności przedstawionej architektury MobileNet v1 pozwoliło zwiększyć dokładność modelu do 70.3% (miara F1=62.7%) dla miliona iteracji oraz do 74% (miara F1=69.8%) dla 4 milionów iteracji w przeprowadzonym eksperymencie. W dalszej części przedstawiono realizację analogicznych badań dla architektury Faster R-CNN która pozwoliła na uzyskanie dokładności 82.3% (miara F1=80.6%). Autor przedstawia analizę procesu uczenia biorąc pod uwagę szereg parametrów takich jak: wielkość zbioru uczącego, wpływ zbioru na proces uczenia, miarę dokładności, zastosowaną architekturę sieci neuronowej, wielkość (t.j. sposób transformacji) badanego obrazu.
- **Rozdział piąty** stanowi przeniesienie do kolejnego problemu badawczego obejmującego analizę metod uczenia maszynowego w tym regresji liniowej do wsparcia eksploatacji predykcyjnej turbin gazowych. W rozdziale przedstawiony został przypadek turbiny LM2500, a w szczególności problematyka nie bezpośredniego określania ciśnienia łożyska za pomocą wskazań innych czujników zamontowanych na turbinie. Opracowanie takiej korelacji wymusza analizę danych historycznych. Autor przedstawia wyniki przeanalizowanych danych pochodzących od 40 turbin gazowych o podobnej konstrukcji, z których każda wyposażona była w zestawy czujników (nawet do 1650) rejestrujących parametry przepływu w turbinie z określonym interwałem czasowym. Taki zestaw danych stanowi wielowymiarową

przestrzeń umożliwiającą budowę modelu korelacyjnego i w dalszej części możliwość wnioskowania. Na podstawie wiedzy eksperckiej autor buduje odpowiedni zbiór cech dla modelu wnioskującego. W dalszej części pracy za pomocą przedstawionych miar autor opracowuje model optymalizacyjny pozwalające na wybranie najlepszych metod predykcyjnych. Metody te można podzielić z uwagi na zastosowanie modeli liniowych do predykcyjnego wsparcia zadań obsługowo - eksploatacyjnych oraz na metody o największej dokładności.

W pierwszym określonym przypadku najbardziej optymalną metodą okazał się model regresji liniowej L1/L2 (Elastic Net o wartości błędu RMSE = 0.221). W drugim przypadku model lasów losowych (o wartości RMSE = 0.018). Autor dokonuje również krótkiego podsumowania uzyskanych wyników biorąc pod uwagę architekturę sieci i wartość optymalizowanych hiper parametrów do dostrajania procesu uczenia modelu.

- **Rozdział szósty** w którym autor podsumowuje wyniki przeprowadzonych badań wraz z parametryczną oceną uzyskanych wyników dla poszczególnych modeli.

Wyniki te obejmują:

- opracowanie zbioru danych do uczenia i testowania możliwości wykrywania aparatów bezzałogowych;
- metodę zautomatyzowanego opisu posiadanych danych, która może być zastosowana w innych obszarach badawczych;
- modeli kaskad Haar'a do zastosowań związanych z wykrywaniem obiektów wielowirnikowych;
- wybór optymalnej architektury sieci do przedstawionych w pracy zastosowań oraz metod regresji i predykcji z wykorzystaniem uczenia maszynowego do utylitarnych zastosowań.

Autor demonstruje znakomitą znajomość problematyki metod sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego potwierdzoną walidacją dla rzeczywistych aplikacji. W rozdziale tym autor przedstawia również dalsze kierunki pracy.

- **Wykaz cytowanej literatury** obejmującej 290 pozycji.
- **Załącznik A** obejmujący opis metod poszerzania zbiorów danych do procesu uczenia i walidacji;
- **Załącznik B** obejmujący opis zastosowania sieci konwolucyjnych w procesie klasyfikacji i wizualizacji danych.

2. Ocena tematu, celu i zakresu pracy

Autor przedstawia cele, tezę i zakres swojej rozprawy w rozdziale pierwszym. Głównym celem rozprawy przedstawionym przez doktoranta jest dowiedzenie iż **metody uczenia maszynowego mogą być wykorzystane w wyzwaniach dla sektora lotniczego obejmujących klasyfikację i predykcję**. Istotna jest również świadomość doktoranta o istniejących ograniczeniach w użyteczności tych metod z uwagi na małe ilości danych oraz konieczność wyboru odpowiednich poziomów dokładności i parametrów modeli.

Praca przedstawiona przez autora w znaczącej mierze obejmuje zagadnienia właściwe dla informatyki i nauk ścisłych i ta waga na podstawie przedstawionego opisu zdaje się znacząco przeważać. Jednakże doktorant dokonuje zastosowania tych metod w eksperymentalnych obszarach inżynierii mechanicznej czyniąc tę pracę interdyscyplinarną i ciekawą z utylitarnego punktu widzenia.

Znaczącą część pracy obejmuje rzetelnie przedstawiony kurs metod tworzenia modeli uczących i walidujących z wykorzystaniem różnych rodzajów sieci neuronowych oraz modeli regresyjnych i klasyfikacyjnych. Istotnym elementem tej pracy jest też znaczący wysiłek doktoranta związany z przygotowaniem odpowiednich zbiorów testowych i uczących. Autor dzieli tę pracę na dwa główne zastosowania - detekcyjny i klasyfikacyjny pozwalający na utylitarne zastosowanie metod sztucznej inteligencji w analizie obrazu oraz wykorzystanie metod i modeli uczenia maszynowego do wsparcia eksploatacji. Taki podział powoduje pewien dysonans i niedosyt związany z ogólnym przedstawieniem tych zagadnień. Każde z tych zagadnień może stanowić odrębną pracę i pomimo znaczącego wysiłku doktoranta związanego z przygotowaniem pracy i przedstawieniu finalnych wyników w dysertacji znacząco brakuje szczegółowych opisów podejścia do problemu określania warunków brzegowych do analizy zdjęć oraz eksploatacji turbin gazowych.

W pierwszym przypadku zabrakło szczegółowego opisu stanów klasyfikacyjnych, analizy zagrożeń i przypadków związanych z różnicowaniem obrazów dla pojawiających się aparatów bezzałogowych. Autor ma świadomość szeregu przeszkód i ograniczeń w tym również związanych z oceną zdjęć w obszarze zurbanizowanym i poza nim, jednakże warto przeprowadzić dyskusję związaną z innymi elementami wpływającymi na detekcję i takimi jak: inne obiekty wpływające na fałszywie pozytywną klasyfikację, gwałtowne zmiany położenia i ruchy obiektu, czy też wpływ pory oświetlenia i kolorów obiektu na możliwość jego detekcji.

Analogiczny związek występuje w przypadku turbin gazowych. Przedstawienie bardziej szczegółowej dyskusji o modelu diagnostycznym łożyska na przykładzie opisu parametrów czujników zbierających dane o pracy turbiny pozwoliłoby na głębsze

rozumienie celowości tak szerokiej analizy metod regresji w szczególności z uwagi na niewielką zmienność np. parametru RMSE w niektórych zastosowaniach.

Głównym celem autora jest propozycja wykorzystania opracowanych przez niego metod sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego do rzeczywistych zastosowań co powoduje, iż uzyskane w pracy wyniki mogą zostać wykorzystane w praktyce eksploatacyjnej lub zastosowaniach detekcyjnych co wskazuje, iż **praca ma charakter aplikacyjny**.

Ponadto autor stosuje metody informatyczne w obszarach inżynierii mechanicznej co powoduje, iż praca ma charakter **interdyscyplinarny**.

Na tej podstawie **uwzględam, iż podjęcie zaproponowanej tematyki jest celowe i użyteczne** a praca z uwagi na jej zakres badawczy obejmujący specjalizowane metody klasyfikacji i wnioskowania w odniesieniu do aplikacji rzeczywistych oraz eksperymentalną weryfikację wyników ma charakter **użyteczny**.

3. Ocena rozprawy

Zaproponowane przez autora pracy podejście badawcze zawiera elementy procesu badawczego i naukowego. Jest w niej proces poznawczy w postaci szczegółowo przedstawionej kuchni wiedzy dotyczącej aktualnych metod transferu wiedzy i uczenia maszynowego. W pracy zawarty jest proces badawczy w postaci opracowanej bazy do badań wraz z procesem opisu i weryfikacji oraz realizacji badań za pomocą przygotowanych modeli uczących i klasyfikacyjnych. Na podstawie uzyskanych wyników autor przeprowadza szczegółowy proces analityczny z omówieniem uzyskanych wyników. Ponadto autor porównuje uzyskane wyniki tworząc model optymalizacyjny wyboru odpowiednich metod uczenia i klasyfikacji do konkretnych zastosowań. W mojej opinii autor jest doświadczonym analitykiem danych biegle posługującym się nowoczesnymi narzędziami programistycznymi. Ten charakter doświadczenia znacząco przebija się w kompozycji szeregu sformułowań i opisów technicznych wprowadzając pewną żargonowość sformułowań i pewne logiczne skróty myślowe widoczne w pracy.

Jednakże w mojej ocenie praca spełnia wymagania związane z wniesieniem oryginalnego wkładu w obszar poznawczy dziedziny naukowej jaką zajmuje się doktorant a nawet znacząco wykracza poza dziedzinę w jakiej przygotowana jest dysertacja. Praca zawiera metody i narzędzia warsztatu pracy badawczej, łącznie z przygotowaniem planowaniem i wykonaniem eksperymentu badawczego. Przedstawiona tematyka jest bardzo aktualna i dotyczy coraz powszechniejszych zastosowań metod analizy danych oraz wykorzystania sztucznej inteligencji w praktyce przemysłowej. Przedstawiona do oceny praca ma charakter **użyteczny** i

interdyscyplinarny a wynikające z niej wnioski mogą zostać wykorzystane do implementacji opracowanych w pracy metod do innych zastosowań przemysłowych. Praca jest napisana bardzo dobrym językiem angielskim.

Do podstawowych zalet rozprawy pod względem opisu przedstawionego problemu, wyboru metod i zakresu badań oraz sposobu jego rozwiązania zaliczam:

- a) podjętą ciekawą tematykę rozprawy oraz szeroki zakres przedstawionych w pracy badań eksperymentalnych;
- b) opracowanie metodologii przygotowania i opisu danych pomiarowych;
- c) bardzo dobrze przeprowadzoną część badawczą w zakresie wyboru architektury sieci, metod analitycznych oraz klasyfikacyjnych w przedstawionych zastosowaniach;
- d) szeroko przeprowadzone rozpoznanie literaturowe oraz przedstawioną dawkę wiedzy dotyczącą architektury sieci, metod uczenia i klasyfikacji;

Z uwagi na szeroki zakres przeprowadzonych badań praca nie jest wolna od wad do których zaliczam:

a) brak szczegółowej i głębszej dyskusji dotyczącej ograniczeń proponowanego rozwiązania dla obydwu przedstawionych przypadków. W pierwszym przypadku nasuwa się pytanie czy zaproponowana metoda bazująca na selektywnie przygotowanym modelu danych do uczenia bierze pod uwagę również takie czynniki jak: gwałtowne zmiany położenia (zmiana geometrii obiektu), pojawianie się innych obiektów w kadrze - co wymusza dyskusję np. dotyczącą analizy strumieni wideo a nie pojedynczych klatek rejestrowanego obrazu i również wykorzystania metod analizy - filtracji obrazu do wsparcia detekcji. W drugim przypadku brakuje opisu fizycznego modelu wraz zastosowanymi parametrami pomiarowymi korelującymi tzw. „wirtualny czujnik” dla monitorowania parametrów pracy łożyska.

b) Nierównomierny podział elementów pracy - tj. ogniskujący się na szczegółowym opisie metod uczenia i wprowadzenia do sztucznej inteligencji bez opisów wprowadzających do eksperymentów wraz z bardziej szczegółowym przedstawieniem przykładowych przypadków.

c) częste stosowanie kaskadowych skrótów i nazw miar, metryk oraz funkcji co utrudnia czytanie pracy. Takie podejście powoduje, iż w przypadku prac interdyscyplinarnych szereg stosowanych skrótowo nazw może mieć dualne znaczenie. Nie jest to wada dyskwalifikująca pracę ale skłaniająca do refleksji w szczególności w aspekcie dalszej pracy naukowej autora.

Pytania i wątpliwości jakie pojawiły się podczas analizy niniejszej pracy a w szczególności dotyczące:

- motywacji i celów szczególnych dysertacji;
- możliwości wykorzystania metod filtracji i analizy sygnału;
- architektury sieci i kryteriów wyboru metody optymalnej;
- podejścia do kryterialnego zastosowania metod uczenia maszynowego i modeli predykcyjnych w eksploatacji urządzeń i obiektów;

zostały wyjaśnione w trakcie wymiany poglądów z doktorantem.

Podsumowując, uważam, iż praca przedstawiona przez autora jest oryginalnym i bardzo ciekawym podejściem do wykorzystania w zastosowaniach nie tylko lotniczych ale również praktyce przemysłowej i stanowi istotny wkład w implementacyjny rozwój tych metod do użytecznych zastosowań.

4. Wniosek końcowy

Praca doktorska przedstawiona przez mgr inż. Macieja Pawełczyka jej zawartość i forma pomimo opisanych wad wskazuje na jego znaczną wiedzę w zakresie wykorzystania metod sztucznej inteligencji oraz uczenia maszynowego w zastosowaniach przemysłowych w obszarze dyscypliny inżynieria mechaniczna. Przedstawiona praca pozwala na stwierdzenie, iż autor stosuje nowoczesne metody realizacji badań i oceny wyników, wykorzystuje metody prezentacji i walidacji danych z wykorzystaniem szerokiej palety narzędzi programistycznych i umie formułować i przeprowadzać eksperymenty badawcze.

Podsumowując uważam, że poziom przedstawionej pracy **spełnia wymagania stawiane** rozprawom doktorskim w rozumieniu **art. 13 pkt 7 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789) w związku z Art. 179, ust.1, Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r., „Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym” (Dz.U. z 2018 r., poz. 1669)**. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Macieja Pawełczyka do publicznej obrony jego rozprawy w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

