

Kraków, dnia 26. listopada 2024 r.

dr hab. inż. Maciej Kłaczyński, prof. AGH  
Katedra Mechaniki i Wibroakustyki  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica  
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Michała Bukały  
pt. „System automatycznej detekcji i klasyfikacji zdarzeń akustycznych  
związanych z przelotami statków powietrznych”**

1. Wstęp

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr Michała Bukały pt. „System automatycznej detekcji i klasyfikacji zdarzeń akustycznych związanych z przelotami statków powietrznych” została wykonana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport z dnia 10.10.2024r. oraz pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, Pana dr hab. inż. Piotra Fołęgi, prof. PŚ z dnia 30.10.2024r. (sygn. RDILGT.512.10.2024) oraz właściwej przedmiotowej umowy.

Ocena rozprawy została przygotowana zgodnie z wymogami ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 poz. 1668 z późniejszymi zmianami).

2. Ocena rozprawy doktorskiej

2.1 Uwagi o wyborze tematyki pracy

Hałas staje się jednym z czynników oddziaływujących na środowisko, któremu w krajach wysoko rozwiniętych poświęca się szczególną uwagę. W Unii Europejskiej, a co za tym idzie w Polsce ustalono ujednoczone wymagania dotyczące oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku (Dyrektywa 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 25 czerwca 2002 r.). Celem wprowadzenia tych wytycznych do systemu prawnego jest zapewnienie ochrony zdrowia, komfortu życia oraz dobrego samopoczucia mieszkańców globu. Podczas eksploatacji środowiska poprzez emisję znacznych ilości energii akustycznej, zarządzający drogą, linią kolejową, tramwajową, portem lotniczym czy obiektem przemysłowym są zobowiązani do monitorowania tej emisji. Ciągłe monitorowanie klimatu akustycznego portu lotniczego stwarza problemy związane z dużą liczbą zarejestrowanych danych, bardzo często reprezentujących informacje niezwiązane z badanym źródłem hałasu. W takim obszarze, znajdują się inne źródła hałasu traktowane wówczas jako źródła zakłóceń. Manualne zweryfikowanie danych pochodzących z monitoringu akustycznego jest procesem czasochłonnym, natomiast stosowanie specjalnych systemów czy urządzeń wspierających rozpoznanie źródeł hałasu jest dodatkowym, wysokim kosztem finansowym już i tak

stosunkowo drogiej profesjonalnych stacji monitoringu hałasu. Obserwowany wzrost dostępnych mocy obliczeniowych oraz rozwój metod uczenia maszynowego umożliwi coraz częstsze zastępowanie pracy i czynności wykonywanych przez człowieka metodami inteligencji obliczeniowej. Potwierdza to także tematyka opiniowanej rozprawy doktorskiej. Szczególna przydatność przedstawionych w rozprawie rozwiązań jest związana z poprawnym wyznaczeniem długookresowych średnich poziomów dźwięku  $A - L_{DWN}, L_N$  (rozumianym jako wynik obarczony niewielką niepewnością) pochodzącego od konkretnych źródeł w konkretnym miejscu i porównanie ich z wartościami dopuszczalnymi.

Biorąc pod uwagę powyższe, uważam, że tematyka pracy jest aktualna a badania nad wykorzystaniem informacji zawartych w sygnale akustycznym do detekcji operacji lotniczych w monitoringu poziomów hałasu ma istotne znaczenie naukowe i stosowane.

## 2.2 Charakterystyka pracy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska liczy 151 stron i składa się z 9 rozdziałów, oraz bibliografii zawierającej 89 pozycje, spisu ilustracji, spisu tabel, dodatku A zawierającego szczegóły badanych architektur sieci i dodatku B zawierającego szczegółowy opis implementacji systemu detekcji.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie w zagadnienia związane z tematyką rozprawy doktorskiej czyli transportu lotniczego oraz problematyki towarzyszącej - emisji hałasu do środowiska. Poprawnie została sformułowana teza pracy wraz z pięcioma szczegółowymi celami służącymi jej uwiarygodnieniu. Najważniejszym celem opisywanego zadania badawczego jest uzyskanie gotowego do wdrożenia algorytmu realizującego proces detekcji zdarzeń akustycznych związanych z wykonywaniem operacji lotniczych, rejestrowanych przez przyrządy pomiarowe produkowane przez firmę SVANTEK, w której pracuje Doktorant. W ostatniej części tego rozdziału zwięźle przedstawiono układ całej pracy.

W rozdziale drugim omówiono wybrane zagadnienia teoretyczne związane z akustyką w lotnictwie, w szczególności podstawowe pojęcia i parametry stosowane w pomiarach i ocenie hałasu tj. poziom ciśnienia akustycznego, poziom dźwięku  $A$ , równoważny i ekspozycyjny poziom dźwięku, analizę częstotliwościową i filtry o szerokości 1/3-oktawy stosowane w metrologii akustycznej. Następnie przedstawiono krótką charakterystykę sygnałów akustycznych generowanych przez przeloty statków powietrznych, systemy monitoringu hałasu lotniczego oraz znane i obecnie stosowane metody detekcji zdarzeń akustycznych.

W rozdziale trzecim przedstawiono zagadnienia teoretyczne związane z sztucznymi sieciami neuronowymi od pojęć i założeń podstawowych przez omówienie najnowszych rozwiązań stosowanych w głębokim uczeniu (ang. deep learning) czyli konwolucyjnych i rekurencyjnych sieciach neuronowych oraz metody oceny skuteczności ich działania – cechy takie jak czułość, precyzja, swoistość, dokładność, parametry F-Score, MCC (ang. Matthews Correlation Coefficient) oraz krzywe ROC (ang. Receiver Operating Characteristic) i PR (ang. precision-recall). Rozdział ten w odpowiedni i wystarczający sposób przedstawia

ogrom wiedzy dostępny w literaturze, a niezbędny do wyjaśnienia działań wykonanych w ramach realizacji przedmiotowych badań.

W rozdziale czwartym zawarto opis badań terenowych służących zebraniu reprezentatywnego materiału badawczego. W szczególności zawarto opisy: zastosowanej metodyki pomiarów zgodnej z obowiązującymi regulacjami prawnymi; wykorzystanej aparatury pomiarowej; charakterystyki punktów pomiarowych zlokalizowanych w ramach ciągłego monitoringu hałasu dla dwóch dużych polskich lotnisk. Rozdział ten zawiera również przedstawienie na przykładach z zebranego materiału najważniejszych cech charakteryzujących hałas lotniczy, zarówno w przebiegach czasowych poziomu dźwięku A jak analizie widmowej 1/3 oktawy. W następstwie tego, opisano sposób manualnej klasyfikacji zdarzeń akustycznych powodowanych przez operacje lotnicze przy wykorzystaniu informacji pochodzących od transpondera ruchu lotniczego. Ostatecznie, zebrano materiał badawczy w postaci 4,4 GB danych w binarnym w formacie svl czyli tzw. loggerach – czasowych przebiegach poziomu dźwięku A oraz odpowiadających im widmach poziomu dźwięku w pasmach częstotliwości 1/3-oktawowych, obejmujących łącznie zakres 362 dni, z których stosując manualne metody detekcji i korelacji z danymi operacyjnymi wyodrębniono 15 268 zdarzeń akustycznych odpowiadających operacjom lotniczym. W mojej opinii, materiał taki stanowi dobrą podstawę do dalszych prac i obliczeń. Za cenne należy uznać przedstawienie na przykładach podstawowych błędów występujących podczas tego typu obróbki danych.

Rozdział piąty zawiera w oparciu o obecny stan wiedzy oraz technologii wyniki przeprowadzonych analiz mających na celu ostateczną weryfikację kierunku prowadzonych badań. Przedstawiono koncepcje systemu detekcji zdarzeń związanych z operacjami lotniczymi na ciągłych przebiegach poziomu dźwięku A w dwóch wariantach – metody wieloproęgowej badania zmienności historii czasowej wraz z analizą gradientów narastania i zaniku poziomu dźwięku A oraz metody z użyciem konwolucyjnych sieci neuronowych zaproponowaną w pracach N. Heller'a i prezentując wyniki treningu sieci CNN na własnych danych wejściowych. Autor dokonał porównania obu metod, wykazując że metoda CNN osiąga zadawalające wartości parametrów jakości detekcji – precyzję, czułość, F-Score,  $\Delta L$ ,  $\Delta n$ . Na tej podstawie została wybrana ostateczna metoda do dalszych prac. W dalszej części rozdziału opisano kluczowe założenia autorskiego rozwiązania, m.in. ustalając, że koncepcja oparta jest o połączenie quasi-ciągłego wskaźnika identyfikacji hałasu lotniczego uzyskiwanej na podstawie klasyfikacji kolejnych ramek o stałej długości przez sieć neuronową, operującą na danych spektralnych o rozdzielczości 1/3 oktawy, rejestrowanych przez urządzenia pomiarowe z rozdzielczością czasową 500 ms. Zaprezentowano oczekiwany sposób funkcjonowania algorytmu detekcji hałasu lotniczego. Jako szczególnie cenny należy przywołać podrozdział prezentujący architekturę algorytmu przetwarzania, gdzie Doktorant przedstawił zarówno wstępną koncepcję funkcjonowania algorytmu detekcji opartą o dane przetworzone do trójwymiarowych macierzy (ramek) wykorzystujące informację z przebiegów czasowo-częstotliwościowych i kilku punktów monitoringu hałasu w pobliżu lotniska oraz dwustopniowe przetwarzanie danych sieciami konwolucyjnymi i siecią rezydualną RNN z warstwą LSTM (ang. Long-Short Term Memory) zakończoną warstwą decyzyjną. Ostatecznie, koncepcja ta została poprawiona i uproszczona o redukcję drugiego stopnia przetwarzania.

Rozdział szósty przedstawia opis wykonanych eksperymentów w ramach których przeprowadzono treningi i ocenę skuteczności działania 300 architektur sieci neuronowych. Wykorzystano środowisko Colab PRO, język Python z bibliotekami Keras i TensorFlow. Rozdział ten stanowi bardzo szczegółowy opis poczynionych przez Autora działań m.in. przygotowania zbiorów danych treningowych i walidacyjnych, problemów i błędów w etykietowaniu danych w otoczeniu innych zdarzeń, problemu danych mieszanych – zawierających ramki w których występuje zarówno klasa pozytywna jak i negatywna rozpoznania hałasu lotniczego, problemu występujących innych zakłóceń i nietypowych zdarzeń. W wyniku tych działań ustalono sposób przygotowania zestawu danych treningowych przedstawiony w podrozdziale 6.2.5 dobierając różne długości ramek danych wejściowych do sieci neuronowej. W kolejnych etapach metodą eksperymentalną dokonano wyboru najlepszej architektury w zależności od wielkości tych ramek i punktu widzenia jakości klasyfikacji (powierzchni pod krzywą PR).

W rozdziale siódmym wykorzystując przeprowadzone i zaprezentowane w rozdziale szóstym eksperymenty dokonano ponownego wytrenowania grupy modeli a następnie w oparciu o dodatkowe dane dokonano strojenia wartości progowej klasyfikatora. Następnie przeprowadzono końcowe testy i porównania z manualnie wyznaczonymi zdarzeniami, uzyskując skuteczność klasyfikacji ok. 95%. Autor nie poprzestał na tych eksperymentach, dokonał jeszcze sprawdzenia architektur sieci rekurencyjnych względem sieci rezydualnych uzyskując wyniki na poziomie ok 80%.

Ósmy rozdział zawiera krótki opis wdrożenia opracowanego rozwiązania. Dokonano tego w dwóch systemach firmy SVANTEK tj. oprogramowaniu SMHL stosowanym do identyfikacji i korelacji zdarzeń akustycznych związanymi z operacjami lotniczymi dla pięciu lotnisk w Polsce wykonywanym przez akredytowane Laboratorium Badawcze AB 1291 firmy SVANTEK oraz w platformie SvanNET. Wdrożenie rozwiązania rozszerzyło możliwości platformy o wskazywanie na wykresach historii czasowych fragmentów sygnału, w których dominuje hałas lotniczy.

Rozdział dziewiąty, ostatni, stanowi podsumowanie rozprawy doktorskiej z odniesieniem się do zdefiniowanej tezy i przyjętych celów szczegółowych.

Podsumowując stwierdzam, że podjęty problem badawczy został sformułowany poprawnie, tak pod względem obszaru merytorycznego, prowadzonych rozważań, analiz i przeprowadzonych badań. Z punktu widzenia określonej tezy i celów szczegółowych, podjęta koncepcja badań jest w pełni uzasadniona, a zastosowane metody badawcze są adekwatne. Stwierdzam, że zarówno materiał literaturowy jak i badawczy został przez Autora rozprawy wykorzystany poprawnie. Na podstawie treści pracy można w sposób jednoznaczny ocenić wkład własny Doktoranta, m.in. w dobór sposobu reprezentacji danych wejściowych (wektor cech), dobór i optymalizację architektury modelu, kalibrację modelu, wdrożenie rozwiązania do istniejących oprogramowań służących analizom akustycznym.

### 2.3 Uwagi szczegółowe i ocena poziomu edytorskiego rozprawy

Układ rozprawy jest przejrzysty a treści prezentowane w kolejnych rozdziałach są ze sobą dobrze powiązane. Praca pod względem edytorskim jest opracowana starannie.

### 3. Wniosek końcowy

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr Michała Bukały pt. „System automatycznej detekcji i klasyfikacji zdarzeń akustycznych związanych z przelotami statków powietrznych” stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego, prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie, potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego prac naukowych oraz spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą Ustawę z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2021r. poz.478 z późn. zm.) i wnioskuję o jej przyjęcie oraz o dopuszczenie do publicznej obrony.

Recenzję podpisał  
Maciej Kłaczyński