

Prof. dr hab. inż. Mirosław Meissner
Instytut Podstawowych Problemów Techniki
Polskiej Akademii Nauk
ul. Pawińskiego 5B
02-106 Warszawa

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Damiana Węgrzyna pt. „Predykcja parametrów organów i piszczałek organowych na podstawie analizy pomiarów nieinwazyjnych”

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą formalną niniejszej recenzji jest pismo prof. dr hab. Marii Elżbiety Orłowskiej, Przewodniczącej Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Polsko-Japońskiej Akademii Technik Komputerowych, z informacją o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr. inż. Damiana Węgrzyna pt. „Predykcja parametrów organów i piszczałek organowych na podstawie analizy pomiarów nieinwazyjnych”. Rozprawa została przygotowana pod opieką naukową promotor dr hab. Alicji Wieczorkowskiej, prof. PJATK, oraz promotora pomocniczego dr. inż. Piotra Wrzeciono. Recenzja została opracowana zgodnie z wymogami ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) oraz zgodnie z ogólnymi zasadami oceny prac doktorskich.

2. Struktura rozprawy i informacje o jej poszczególnych częściach

Struktura rozprawy jest typowa dla prac w postaci cyklu publikacji charakteryzujących się spójnością tematyczną. Na początku rozprawy znajduje się oświadczenie, potem streszczenia pracy w języku polskim i angielskim, podziękowania oraz spis treści. Rozdział 1 zawiera wprowadzenie w zagadnienia związane z tematyką rozprawy, w którym Doktorant wskazuje na motywacje do prowadzenia badań w tej tematyce i formułuje następujące tezy badawcze:

- 1) Istnieje zależność między obecnością przeszkody w polu bliskim wargi piszczałki labialnej a zmianą jej parametrów sygnałowych, co pozwala na predykcję zmiany częstotliwości podstawowej i poziomu dźwięku w procesie strojenia instrumentu.
- 2) Zjawisko nieliniowej zmiany częstotliwości podstawowej sygnału akustycznego piszczałki labialnej, wynikające z interakcji z przeszkodą, daje się opisać za pomocą

modelu opartego na funkcji logarytmicznej, wykazującego wysoki stopień zgodności z rzeczywistymi danymi.

- 3) Zastosowanie głębokich sieci neuronowych do danych reprezentujących widmo sygnału akustycznego umożliwia automatyczną i wysoce skuteczną klasyfikację typów konstrukcyjnych warg piszczałek organowych.
- 4) Modele uczenia maszynowego umożliwiają rekonstrukcję parametru ciśnienia powietrza w organach piszczałkowych z wysoką precyzją, wykorzystując jedynie zbiór cech geometrycznych i częstotliwościowych niekompletnego zestawu piszczałek wargowych.

Następnie Doktorant wymienia potencjalne kontrybucje, czyli uzyskane wyniki badań, które jego zdaniem wnoszą wkład do nauki.

Rozdział 2 zawiera przegląd literatury obejmujący takie zagadnienia jak: podstawy fizyczne procesu generacji dźwięku w piszczałkach labialnych, nieinwazyjne techniki pomiarowe służące do akwizycji i przetwarzania danych opisujących procesy fizyczne zachodzące w piszczałkach organowych, modelowanie obliczeniowe i symulacje numeryczne w analizie i syntezie dźwięku piszczałek organowych oraz metody maszynowego, w tym głębokiego uczenia w badaniach akustycznych.

Rozdział 3 odnosi się do cyklu publikacji włączonych do rozprawy, zawierający ich krótki przegląd obejmujący cel pracy, najważniejsze wyniki i wnioski wraz informację, którą z tez badawczych potwierdzają uzyskane rezultaty. W skład tego cyklu wchodzi następujące publikacje:

- P1. Węgrzyn, D., Wrzeciono, P. (2019). Problem of Placing the Organ Pipes on the Windchest. *Vibrations in Physical Systems*, 30(1), 1–8.
- P2. Węgrzyn, D., Wrzeciono, P., Wieczorkowska, A. (2021). Recognition of the Flue Pipe Type Using Deep Learning. In: M. Stettinger, G. Leitner, A. Felfernig, Z.W. Ras (eds) *Intelligent Systems in Industrial Applications. ISMIS 2020. Studies in Computational Intelligence*, vol 949. Springer Cham, 80–93.
- P3. Węgrzyn, D., Wrzeciono, P., Wieczorkowska A. (2022). The Dependence of Flue Pipe Airflow Parameters on the Proximity of an Obstacle to the Pipe's Mouth. *Sensors*, 22(1), 10, 1–15.
- P4. Węgrzyn, D., Wrzeciono, P., Wieczorkowska, A. (2024). The Reconstruction of Blowing Pressure in Pipe Organ Using Machine Learning. In B. Marcinkowski, A. Przybyłek, A. Jarzębowicz, N. Iivari, E. Insfran, M. Lang, H. Linger, C. Schneider (eds), *Harnessing Opportunities: Reshaping ISD in the post-COVID-19 and Generative AI Era (ISD2024 Proceedings)*. Gdańsk, Poland: University of Gdańsk, 1–5.

- P5. Węgrzyn, D., Wrzeciono, P., Wieczorkowska, A. (2026). Predictive Algorithms for Determining Blowing Pressure in a Pipe Organ. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 74(1), e156771, 1–13.

Powyższe prace zostały opublikowane w czasopismach lub monografiach pokonferencyjnych, które zgodnie z ostatnim wykazem czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych odpowiadają 70, 20, 100, 140 i 100 punktom ministerialnych, co daje w sumie 340 punktów za wszystkie prace, co jest satysfakcjonujące w odniesieniu do rozprawy doktorskiej w postaci cyklu publikacji.

Rozdział 4 stanowi podsumowanie rozprawy, które jest istotne w kontekście udowodnienia hipotez badawczych sformułowanych w pracy i odniesienia ich do poszczególnych publikacji wchodzących w skład cyklu. Rozdział 5 jest zestawieniem prac, które były cytowane w przeglądzie literatury w rozdziale 2, natomiast rozdział 6 obejmujący największą część rozprawy, zawiera publikacje wchodzące w skład cyklu zamieszczone w oryginalnej postaci.

3. Ocena rozprawy

Na samym wstępie należy stwierdzić, że recenzowana rozprawa spełnia z nadmiarem wymagania formalne dotyczące rozpraw doktorskich opartych na zbiorze publikacji. Do rozprawy zostało włączonych 5 publikacji powiązanych tematycznie, chociaż rekomendowana minimalna liczba artykułów stanowiących zbiór wynosi trzy. Publikacje ukazały się w czasopismach i materiałach konferencyjnych obecnych w bazach Scopus i Web of Science, natomiast w zaleceniach jest wymóg co najmniej dwóch artykułów. Ponadto, Doktorant jest pierwszym autorem we wszystkich 5 publikacjach, chociaż według zaleceń musi być pierwszym autorem przynajmniej w dwóch artykułach, a w trzecim – co najmniej drugim lub trzecim.

Zgodnie z zaleceniami, rozprawa ma formę zwartego opracowania, w którym zbiór publikacji wchodzących w skład cyklu został poprzedzony częścią wstępną, której istotnym elementem jest rozdział 2 zatytułowany „Przegląd istniejącej wiedzy”. Należy więc ocenić, czy w rozdziale tym przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł literaturowych świadczącą o dostatecznej wiedzy Doktoranta i czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Po pierwsze, stwierdzenie Doktoranta (str. 16), że współczesne modele dotyczące generacji dźwięku w piszczałkach organowych opierają się na koncepcji nieliniowej pętli sprzężenia zwrotnego, zaproponowanej przez Fletchera w 1976 roku, budzi poważne wątpliwości. Doktorant w swojej analizie nie uwzględnił bowiem powstałych w latach późniejszych modeli teoretycznych, w których zaburzenia wirowe, tworzące się w strumieniu wypływającym ze szczeliny, modelowane są za pomocą układu dyskretnych wirów. Poniżej zamieszczono wybrane publikacje dotyczące tego zagadnienia.

- A1. Meissner M. (2002), Aerodynamically excited acoustic oscillations in cavity resonator exposed to an air jet, *Acta Acustica united with Acustica*, 88(2), 170–180.
- A2. Dequand S., Willems J., Leroux M., Vullings R., van Weert M., Thieulot C., Hirschberg A. (2003), Simplified models of flue instruments: Influence of mouth geometry on the sound source, *Journal of the Acoustical Society of America*, 113(3), 1724–1735.
- A3. Auvray R., Ernoult A., Fabre B. (2014), Time-domain simulation of flute-like instruments: Comparison of jet-drive and discrete-vortex models, *Journal of the Acoustical Society of America*, 136(1), 389–400.
- A4. Fabre B. (2016), Flute-like instruments, [in:] *Acoustics of Musical Instruments*, Chaigne A., Kergomard J. (Eds), Springer-Verlag, New York, 559–606.
- A5. Yoshikawa S. (2020), Vortices on sound generation and dissipation in musical flue instruments, [in:] *Vortex Dynamics Theories and Applications*, Harun Z. (Ed.), IntechOpen, London, 43–78.

W rozdziale 2, Doktorant nie ustrzegł się też błędów i nieścisłości.

1. Str. 6, drugie zdanie w drugim akapicie punktu 2.1.1. Określenie „nieliniowy oscylator ze sprzężeniem zwrotnym” jest niepoprawne, gdyż pętla sprzężenia zwrotnego jest integralną częścią każdego oscylatora.
2. Str. 7, pierwsze zdanie. Stwierdzenie, że ton krawędziowy jest znany jako ton eolski jest błędne, co potwierdza rys. 1 z pracy [42], na którą powołuje się Doktorant.
3. Str. 7, drugie zdanie w drugim akapicie. Stwierdzenie, że „korpusu piszczałki działa jak filtr pasmowy, który wzmacnia jedynie te częstotliwości, które są bliskie jego własnym częstotliwościom rezonansowym” jest nieścisłe. Powinno być „aktywny filtr pasmowy”, ponieważ tylko taki układ może równocześnie pełnić rolę pasywnego filtra pasmowego i wzmacniacza.
4. Str. 7, ostatnie dwa zdania w drugim akapicie. W pierwszym zdaniu Doktorant stwierdza, że „otwarty koniec [piszczałki] działa jak proste, pojedyncze źródło emitujące falę dźwiękową we wszystkich kierunkach równomiernie, czyli monopol”, co jest sprzeczne z informacją podaną w drugim zdaniu „Charakterystyka tego promieniowania jest silnie zależna od częstotliwości – niższe harmoniczne rozchodzą się bardziej dookólnie, podczas gdy wyższe składowe tworzą bardziej złożone, kierunkowe wzory promieniowania”.
5. Str. 13, czwarte i piąte zdanie w punkcie 2.2.3. Taki sam błąd jak ten, który został opisany w punkcie 4. W pierwszym zdaniu Doktorant stwierdza, że otwarty koniec rezonatora zachowuje się jak monopol, zaś w drugim zdaniu wskazuje na „silną zależność charakterystyki promieniowania [takiego źródła] od częstotliwości”.

Podsumowując, uważam, że Doktorant w sposób właściwy przeprowadził analizę źródeł literaturowych – wszystkie cytowane publikacje są anglojęzyczne, a ich wybór świadczy o dobrej znajomości literatury przedmiotu. Pewne zastrzeżenia można mieć natomiast do niewystarczająco dobrego rozeznania Doktoranta w zakresie modelowania badanego zjawiska, ale usprawiedliwieniem tego faktu może być to, że jego rozprawa doktorska ma charakter wybitnie aplikacyjny, zaś dane akustyczne wykorzystywane do cyfrowej analizy zostały uzyskane na podstawie badań eksperymentalnych.

Badania przedstawione w cyklu publikacji dotyczą trzech szczegółowych zagadnień związanych z akustyką piszczałek organowych. W publikacjach P1 i P3 analizowano wpływ bliskiego położenia piszczałek na wiatrownicy na częstotliwość i poziom generowanego dźwięku. Badania przedstawione w publikacji P2 dotyczą wykorzystania głębokich sieci neuronowych do automatycznej identyfikacji typu warg piszczałek organowych na podstawie widma zarejestrowanego dźwięku, natomiast w publikacjach P4 i P5 przedstawiono metody wykorzystujące modele uczenia maszynowego do rekonstrukcji ciśnienia powietrza w organach, nawet w przypadku niekompletnego zestawu piszczałek lub uszkodzonego instrumentu.

W publikacji P1 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, których celem było określenie wpływu umiejscowienia piszczałek organowych na wiatrownicy na podstawowe parametry generowanego dźwięku takie jak częstotliwość podstawowa i odpowiadający jej poziom ciśnienia akustycznego. Problem ten jest istotny zarówno z punktu widzenia organmistrzów, jak i muzyków grających na małych organach lub pozytywach, w których piszczałki ustawione są bardzo blisko siebie. Pomiary przeprowadzono dla trzech piszczałek: metalowej o przekroju kołowym (piszczałka otwarta) oraz dwóch drewnianych o przekroju prostokątnym (jedna piszczałka otwarta, druga kryta). Przeszkodę, którą zbliżano do warg badanych piszczałek stanowił korpus piszczałki drewnianej o przekroju prostokątnym. Pomiary wykazały, że efektem zmniejszania odległości przeszkody do piszczałki jest spadek częstotliwości podstawowej oraz zmniejszenie poziomu generowanego dźwięku.

W mojej ocenie, podstawowym mankamentem publikacji P1 jest brak analizy badanego problemu od strony fizycznej – nie wskazano bowiem, jakie zjawiska mogą mieć wpływ na proces generacji dźwięku przy zmniejszaniu odległości przeszkody od piszczałki. W pierwszej kolejności są to oczywiście oddziaływania akustyczne, gdyż dźwięk generowany w piszczałce zostaje odbity od płaskiej, twardej przeszkody, a następnie oddziałuje zwrotnie na zaburzenia wirowe tworzące się przy górnej wardze. Znaczący wpływ na proces generacji dźwięku mogą mieć także zaburzenia prędkości przepływu w wycięciu piszczałki związane z pojawieniem się oporu aerodynamicznego. W przypadku maksymalnego dosunięcia przeszkody do piszczałki Autorzy odnotowali znaczące obniżenie częstotliwości generowanego dźwięku, które odpowiada rozstrojeniu piszczałki aż o 100 centów, a więc obniżeniu dźwięku o półton temperowany.

Moim zdaniem, taki przypadek jest jednak czysto hipotetyczny, ponieważ trudno sobie wyobrazić organmistrza, który projektując małe organy lub budując pozytywny zdecydowanie się na zasłonięcie wycięcia jednej piszczalki przez korpus drugiej piszczalki. Wyniki badań przedstawione w pracy P1 potwierdzają słuszność pierwszej tezy badawczej.

W publikacji P3 badania wpływu obecności przeszkody na generowany dźwięk rozszerzono o kolejne sześć piszczalek, uzyskując taki sam charakter zmian częstotliwości podstawowej przy zbliżaniu przeszkody do piszczalki. Badania prowadzono z wykorzystaniem nieinwazyjnych metod pomiarowych, w związku z tym pojawił się problem, jak w takim przypadku wyznaczyć prędkość przepływu w wycięciu piszczalki. Problem ten rozwiązano wykorzystując analizę opartą na rachunku przedziałowym, która wykazała, że dla przepływu turbulentnego, a więc liczb Reynoldsa powyżej 2300, liczba Strouhala dla piszczalek labialnych jest w przybliżeniu stała i wynosi 0,2. Uzyskany rezultat jest ważny z dwóch powodów, ponieważ dowodzi, że:

- częstotliwość składowej podstawowej zmienia się wprost proporcjonalnie do prędkości przepływu,
- obniżenie częstotliwości składowej podstawowej przy zmniejszaniu odległości przeszkody od piszczalki jest konsekwencją spadku prędkości przepływu.

Innym, ważnym rezultatem otrzymanym przez Autorów jest zależność opisująca zmiany częstotliwości składowej podstawowej w funkcji odległości piszczalki od przeszkody, uzyskana za pomocą regresji logarytmicznej.

W publikacji P3 pojawiły się niestety także nieścisłości, a nawet ewidentne błędy. Po pierwsze, we wzorze (11) określającym długość fali dla piszczalki otwartej należy uwzględnić poprawkę wlotu wynikającą z istnienia masy współdrżającej przy jej otwartym końcu. Po drugie, wyniki obliczeń pokazane na rys. 7 są błędne. Czerwona krzywa na tym rysunku nie mogła bowiem zostać wyznaczona z równ. (25), ponieważ $\ln(x)$ jest funkcją rosnącą w całej dziedzinie, zaś funkcja opisana czerwoną krzywą posiada minimum i maksimum oraz ma wartość skończoną dla $x = 0$.

Badania zaprezentowane w pracy P3 potwierdzają słuszność pierwszej i drugiej tezy badawczej. Moim zdaniem, druga teza została jednak nieprecyzyjnie sformułowana. Jeżeli bowiem zmiany częstotliwości podstawowej są nieliniowe to powinno być sprecyzowane w funkcji jakiego parametru, bo, na przykład, zmiana tej częstotliwości w funkcji prędkości przepływu jest liniowa.

Badania przedstawione w publikacji P2 dotyczyły zagadnienia automatycznej identyfikacji typu warg piszczalek organowych na podstawie pomiarów ich widm akustycznych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. W przeprowadzonych eksperymentach numerycznych sieć neuronowa została wytrenowana na zbiorze danych reprezentujących widma dźwięku generowanego w ośmiu piszczalkach, o wargach zmodyfikowanych przez dodatkowe elementy takie jak: baczki, broda, płytka i wa-

łek. W badaniach porównywano takie architektury sieci neuronowych jak: model oparty na pamięci krótko-długotrwałej, a więc taki rodzaj rekurencyjnej sieci neuronowej, która potrafi zapamiętywać długoterminowe zależności między danymi, modele przetrenowane na zbyt małych zbiorach danych oraz modele z większą liczbą warstw ukrytych, czyli głębokie sieci neuronowe. Ostatecznie za optymalny uznano model głębokiego uczenia składający się z 11 warstw ukrytych, który minimalizuje zjawisko przeuczenia. Osiągnięta przez ten model średnia dokładność identyfikacji typu warg piszczałek organowych na podstawie widma generowanego dźwięku wyniosła aż 98,7%, co stanowi potwierdzenie trzeciej tezy badawczej.

W publikacjach P4 i P5 przedstawiono metodę służącą do rekonstrukcji ciśnienia powietrza w wiatrownicy organów z niekompletnym zestawem piszczałek, w której zastosowano modele uczenia maszynowego. Praca P4 ukazała się w recenzowanych materiałach konferencji ISD2024 jako pięciostronicowy Short Paper, a jej istotnym mankamentem jest to, że kluczowa zależność, określająca związek pomiędzy ciśnieniem w stopie, a częstotliwością podstawową dźwięku i wysokością wycięcia wargi, została podana bez jakiegokolwiek uzasadnienia. Z uwagi na fakt, że praktycznie cała zawartość pracy pokonferencyjnej P4 znalazła się w publikacji P5, w dalszej części recenzji ograniczę się tylko do oceny tej publikacji.

Badania przedstawione w publikacji P5 dotyczyły istotnego problemu pojawiającego się w pracy organmistrzów, a mianowicie rekonstrukcji ciśnienia powietrza w wiatrownicy organów w przypadku niekompletnego zestawu piszczałek lub uszkodzonego instrumentu. Do rozwiązania tego problemu zastosowano uczenie maszynowe, w którym wykorzystano takie algorytmy jak: las losowy (RF), implementacja metody wektorów nośnych (SMOreg), głęboki sieciowy las decyzyjny (DNDF), oraz sztuczne sieci neuronowe takie jak: sieć rekurencyjna (RNN), sieć konwolucyjna (CNN), sieć w pełni połączona (FCNN) oraz perceptron jedno (SLP) i wielowarstwowy (MLP). W badaniach wykorzystano też generatywną sztuczną inteligencję Gemini i Llama, które są dużymi modelami językowymi (LLM). Jako zestaw danych wejściowych do trenowania modeli wykorzystano dane z czterech instrumentów o różnym ciśnieniu w wiatrownicy. Wyniki potwierdziły wysoką skuteczność algorytmu RF przy rekonstrukcji ciśnienia, ponieważ dla instrumentu, w którym brakuje 25%, 50% i 70% piszczałek, wartość współczynnika korelacji Pearsona to odpowiednio 0,97, 0,93 i 0,84. Jeżeli natomiast w instrumencie brakuje aż 90% piszczałek, to najlepsze rezultaty odnotowano dla sieci MLP, dla której współczynnik ten ma wartość 0,84. Badania przedstawione w publikacjach P4 i P5 w pełni potwierdzają słuszność czwartej tezy badawczej, choć w mojej ocenie, w jej treści, na skutek pomyłki, znalazło się niepotrzebne słowo „parametru”.

Podsumowując, uważam, że badania zaprezentowane w rozprawie pozytywnie zweryfikowały wszystkie postawione tezy badawcze. Rozprawa posiada także udokumentowany oryginalny dorobek własny Doktoranta w dyscyplinie Informatyka Tech-

niczna i Telekomunikacja. Przedstawione w rozprawie wyniki są też bardzo istotne pod względem aplikacyjnym i posiadają duży potencjał w kontekście dalszych badań.

4. Uwagi redakcyjne

Rozdział 6 obejmujący największą część rozprawy zawiera opublikowane wcześniej prace zamieszczone w oryginalnej formie. W związku z tym uwagi redakcyjne mają sens jedynie w odniesieniu do rozdziałów 1–5. W mojej ocenie, ta część rozprawy została przygotowana z dużą starannością zarówno pod względem językowym, jak i stylistycznym. Autorowi nie udało się jednak ustrzec pewnych drobnych błędów i nieścisłości, które są wymienione poniżej:

1. Str. 6. Pierwsze zdanie w podrozdziale 2.1 jest niepoprawne pod względem gramatycznym.
2. Str. 13. Pierwsze zdanie w punkcie 2.2.3. Powinno być „właściwości emisyjnych”.
3. Str. 19. W publikacjach 1 i 5 podane woluminy i numery są nieprawidłowe. Powinno być 30(1) i 74(1).
4. Str. 20. Literówka w czwartym zdaniu w trzecim akapicie. Powinno być „w funkcji odległości od przeszkody”.

5. Wniosek końcowy

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Damiana Węgrzyna pt. „Predykcja parametrów organów i puszczatek organowych na podstawie analizy pomiarów nieinwazyjnych” stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego i spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zapisanym w ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.). Rozprawa wykazuje ogólną wiedzę Doktoranta w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja i dowodzi umiejętności prowadzenia zaawansowanych badań naukowych. Pomimo uwag krytycznych rozprawa zasługuje na moją pozytywną ocenę. Wobec tego wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Damiana Węgrzyna i dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Mirosław Meissner