

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA i TECHNOLOGIE
KOSMICZNE**

zaprasza na PUBLICZNĄ OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Macieja Jasińskiego

która odbędzie się w dniu **05 grudnia 2023** roku o godzinie 10:00

w Sali 428 Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych PW

rozprawy doktorskiej:

„Wyznaczanie parametrów akustycznych pomieszczeń z zastosowaniem przestrzennych odpowiedzi impulsowych”

Promotor: prof. dr hab. inż. Jan Żera - Politechnika Warszawska

Recenzenci:

1. Prof. dr hab. inż. Andrzej Dobrucki (Politechnika Wrocławska)
2. Prof. dr hab. inż. Bożena Kostek (Politechnika Gdańska)
3. Dr hab. inż. Paweł Małecki, prof. uczelni (Akademia Górniczo Hutnicza im. Stanisława Staszica)

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1. Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej <https://www.bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-po-30-kwietnia-2019-r/Rada-Naukowa-Dyscypliny-Automatyka-Elektronika-Elektrotechnika-i-Technologie-Kosmiczne/mgr-inz.-Maciej-Jasinski>

Przewodniczący Rady Naukowej
Dyscypliny Automatyka, Elektronika,
Elektrotechnika i Technologie
Kosmiczne Politechniki Warszawskiej
Prof. dr hab. inż. Tomasz Starecki

WPLYNĘŁO

dn.....2023 -09- 04.....

Dr hab. inż. **Paweł Małecki**, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Mechaniki i Wibroakustyki
Tel.: 535 898 119
E-mail: pawel.malecki@agh.edu.pl

Kraków 21 sierpnia 2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. **Macieja Jasińskiego** pt.:

*Wyznaczanie parametrów akustycznych pomieszczeń z zastosowaniem przestrzennych
odpowiedzi impulsowych*

Podstawa opracowania: uchwała Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i
Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej, z dnia 27 czerwca 2023 roku.

I.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została zrealizowana pod opieką Pana promotora, prof. dr hab. inż. Jana Żery i dotyczy ewaluacji wykorzystania nowoczesnych mikrofonów ambisonicznych do badania akustyki pomieszczeń. Mikrofony te służą najczęściej do rejestracji dźwięku przestrzennego w produkcjach muzycznych, multimedialnych projektach filmowych, grach komputerowych oraz w technologiach wirtualnej i rozszerzonej rzeczywistości (ang. *VR, AR – Virtual, Augmented Reality*). Pomimo ich unikalnych właściwości umożliwiających estymację wektora natężenia dźwięku, a tym samym lokalizację źródła dźwięku i kształtowanie charakterystyki kierunkowej rejestrowanego sygnału, relatywnie rzadko wykorzystywane są w metrologii akustycznej (o dziwo!), zarówno w akustyce środowiskowej, jak i architektonicznej czy budowlanej.

Dość oczywistym jest, że za pomocą komponentu zerowego rzędu mikrofonu ambisonicznego, wyznaczyć można większość energetycznych i pogłosowych parametrów akustyki wnętrz, tak samo jak za pomocą ciśnieniowego mikrofonu pomiarowego. Jak jednak słusznie zawarto w pracy, mikrofony te umożliwiają również pomiar przestrzennej odpowiedzi impulsowej (*SRIR*), która po odpowiednim połączeniu ze zmierzoną wcześniej funkcją

przenoszenia głowy (*HRTF*), umożliwiają stworzenie binauralnej odpowiedzi impulsowej (*BRIR*). W związku z powyższym, za pomocą mikrofonu ambisonicznego wyznaczyć można również współczynnik międzyusznej korelacji wzajemnej *IACC* (ang. *Interaural Cross-Correlation Coefficient*), który charakteryzuje przestrzenne własności rozproszonego pola akustycznego. W przeciwieństwie to metod ustandaryzowanych, zastosowanie mikrofonu ambisonicznego nie wymaga użycia tzw. sztucznej głowy do wykonania pomiaru *IACC*, co jest znaczącym udogodnieniem i zmniejszeniem kosztowności oraz czasochłonności pomiarów względem metod tradycyjnych.

Badania przeprowadzone w ramach pracy opisują szereg pomiarów wybranych parametrów akustyki wnętrza za pomocą mikrofonów ambisonicznych i zawierają szczegółowe porównanie wyników z rezultatami otrzymanymi za pomocą ustandaryzowanych metod pomiarowych.

II.

Przedstawiona praca wyróżnia się zwięzłością formy, co jest konwencjonalnie ryzykownym, lecz efektywnym podejściem do prezentacji materiału. Większość prac w podobnej tematyce, z którymi miałem do czynienia jest bardziej obszerna, ale w żadnym stopniu nie jest to mankament recenzowanej pracy, a wręcz przeciwnie. Autor zdecydowanie unika zbędnego wypełniacza i koncentruje się jedynie na kluczowych informacjach, zapewniając czytelnikowi zrozumienie wszystkich niezbędnych pojęć i zagadnień. Język pracy jest ścisły, konkretny i techniczny, co świadczy o profesjonalizmie i głębokiej wiedzy autora na omawiany temat. Jest to nie tylko dowód kompetencji autora, ale również ułatwia szybkie zrozumienie tekstu przez specjalistów w danej dziedzinie. Omawiany temat jest niezwykle ważny i aktualny, co podkreśla znaczenie tej publikacji dla współczesnego świata nauki i technologii. Ponadto otrzymane rezultaty świadczą o konieczności jej publikacji na arenie międzynarodowej oraz przedstawienia propozycji rozwiązania metrologicznego dla odpowiednich komisji technicznych. Wobec powyższego, praca ma potencjalny wpływ na międzynarodową społeczność naukową.

Opis działań wykonany w ramach doktoratu jest zarówno wystarczający, jak i wyczerpujący, co pozwala czytelnikowi na pełne zrozumienie omawianego zagadnienia. Autor z sukcesem realizuje postawione na początku założenia, dostarczając czytelnikowi kompletną i spójną analizę. Koncepcja eksperymentów i badań została zaprojektowana w odpowiedni i przemyślany sposób. Co więcej, wyniki tych badań nie tylko zostały precyzyjnie

zinterpretowane, ale także poddane poprawnej analizie i wnioskowaniu statystycznemu, a także wykonano określenie budżetu niepewności zaproponowanej metody, co jest szczególnie cennym wkładem w aktualny stan wiedzy związany z tematyką pracy. Całość stanowi spójny i dobrze skonstruowany materiał, który w pełni oddaje treść i cel rozprawy. Przegląd oraz analiza źródeł bibliograficznych zostały przeprowadzone w sposób poprawny i rzetelny. Poza tym, autor skutecznie udowodnił postawioną w pracy tezę. Dzięki solidnemu podejściu do analizy, eksperymentów i interpretacji wyników, przekonująco wykazał prawdziwość swojego głównego założenia.

III.

Mimo wielu mocnych stron omawianej pracy, nie można pominąć pewnych aspektów, które budzą pewne wątpliwości. Przede wszystkim zauważalny jest niedosyt wynikający z braku analizy innych kluczowych parametrów przestrzennych, takich jak np. *LE* (ang. *Lateral Efficiency*), *LF* (ang. *Lateral Energy Fraction*) lub *LFC* (ang. *Lateral Fraction Coefficient*). Byłoby korzystne dla pracy, gdyby autor poświęcił więcej uwagi właśnie tym wskaźnikom, stanowiącym wartość dodaną do tematyki.

Rozdział poświęcony dyskusji niestety nie spełnia w pełni swojej roli - zamiast pogłębionej dyskusji czytelnik otrzymuje głównie podsumowanie oraz odniesienia do prac innych autorów. Wprowadzenie rozważań na temat zastosowania alternatywnej bazy *HRTF* czy potencjału algorytmicznego mikrofonu *Zylia* w kontekście dokładności wyznaczanych parametrów, z pewnością wzbogaciłoby tę część pracy.

Również podejście do analizy parametrów energetycznych (*C50*, *C80*), które są mocno uzależnione od relacji źródło dźwięku - odbiornik, wydaje się być nie do końca poprawne. Uśrednianie przestrzenne dla tych parametrów nie jest odpowiednim podejściem, a z pewnością wymagałoby dodatkowego komentarza i dyskusji na ten temat.

Co więcej, pomiar parametrów pogłosowych i energetycznych mógłby zostać skrócony do analizy charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej komponentu *W* sygnału ambisonicznego, co lepiej odpowiadałoby wymaganiom stawianym mikrofonom pomiarowym, niż analiza echogramu. Poza tym, w wykonanym porównaniu echogramów brak jest informacji jak przeprowadzono normalizację sygnałów, a podawany jest procent ich wzajemnego dopasowania. Dodatkowo, 1 ms okna odpowiada okresowi fali 1 kHz i stanowi

swego rodzaju filtrację górno-zaporową, co poniekąd utrudnia wyciągnięcie wniosków dla kluczowych częstotliwości.

Interpretacja otrzymanych wartości parametrów akustycznych w warunkach pola swobodnego komory bezechowej rodzi pewne wątpliwości. Wszelkie parametry do oceny akustyki wewnątrz zostały opracowane dla warunków rozproszonego pola akustycznego, w związku z czym liczne próby interpretacji otrzymanych rozbieżności, w szczególności dla parametrów pogłosowych lub energetycznych są w mojej ocenie bezzasadne, co autor sam czasami przyznaje.

Podsumowując, chociaż praca wykazuje wiele mocnych stron, pewne obszary mogłyby zostać rozwinięte lub poprawione, by w pełni wydobyć potencjał omawianego tematu.

IV.

Szczegółowe pomniejsze błędy, niejednoznaczności lub wady rozprawy:

Str. 5: (...) *SRIR* (...), w połączeniu z funkcją przenoszenia głowy *HRTF* (...) charakteryzują wpływ obecności osoby w polu akustycznym (...)

- zdanie nieprecyzyjne i stosujące za daleko idące skróty myślowe;

Str. 9: wskaźnika międzyusznej korelacji skrośnej *IACC* (ang. *Interaural Cross Correlation*)

- termin ten w polskiej nomenklaturze znam jako współczynnik *międzyusznej korelacji wzajemnej*, ale w związku z tym że większość literatury tematu jest w języku angielskim (nawet polskich autorów), to nie jestem pewien jakie pojęcie jest najbardziej poprawne;

Str. 10: *C80*

- brak zamknięcia nawiasu;

Str. 15: *przestrzajonym tonem*

- drobny błąd gramatyczny, powinno być *tonem przestrzajonym*;

Str. 16: *Genezą analizy przestrzennej odbić są metody geometryczne, stosowane w modelowaniu akustyki pomieszczeń.*

- zdanie w mojej ocenie nieuprawnione, ponieważ przede wszystkim trudno jednoznacznie wskazać genezę tak złożonego problemu, a ja raczej upatrywałbym ją w pierwotnym rozumieniu natury dźwięku;

Str. 17: *Pod pojęciem matrycy mikrofonowej opisuje się dowolną liczbę pojedynczych kapsuł mikrofonowych działających współbieżnie.*

- wydaje mi się, że pojęcie *równoległe*, zamiast *współbieżnie* trochę lepiej oddaje istotę rzeczy;

Str. 19-20: *Rys. 3.1. oraz Tabela 3.1.*

- niska, rastrowa jakość rysunku i wzorów;

Str. 24: *Jak wiadomo, w zjawiskach związanych z propagacją fali występuje aliasing, nazywany w tym przypadku aliasingiem przestrzennym [10, 79], który wynika z niedostatecznego próbkowania pola akustycznego za pomocą skończonej liczby harmonik sferycznych w sensie relacji do długości fali.*

- Nieprecyzyjne zdanie. Aliasing występuje podczas dyskretyzacji sygnału, a nie podczas propagacji fali. W tym przypadku z aliasingiem przestrzennym mamy do czynienia w ramach rozkładu, analizy lub syntezy funkcji dwu lub trzy-wymiarowej na ortogonalne funkcje bazowe. Względnie można to określić jako *kwantyzacja przestrzeni*, ponieważ termin *próbkowanie* odnosi się bezpośrednio do czasu, a w tym przypadku, zdecydowanie można od niego abstrahować. Poza tym, styl językowy zdania jest mało elegancki.

Str. 27: *Zasadniczym czynnikiem jest właściwe dopasowanie zbioru punktów HRTF do kierunków nadejścia dźwięku zarejestrowanych w sygnale ambisonicznym po jego przekształceniu do formatu B. Istota problemu polega na minimalizacji błędu wynikającego z różnicy siatki pomiarów HRTF i rozdzielczości przestrzennej sygnału ambisonicznego związanej z dekompozycją na harmoniki sferyczne przy ograniczeniu wynikającego z rzędu ambisonii.*

- przekształcenie do B-formatu jest czynnością formalną. A-format jest w zasadzie nieprzydatny i nie ma nigdzie zastosowania. Zasadniczą kwestią jest estymacja wektora natężenia dźwięku, której precyzja nie jest związana z rzędem ambisonii. Niemniej jednak wnioskowanie jest zasadniczo poprawne.

Str. 32: *(...) z użyciem mikrofonu ambisonicznego 1-go rzędu Soundfield ST-350, przy czym główne parametry akustyczne wyznaczono kanałem W, a wskaźnik energii bocznej LF z użyciem kanału Y. Prace [20, 46] odnosiły się do akustyki obszarów lodowych Spitsbergenu i Svalbardu, a w pomiarach stosowano mikrofon ambisoniczny pierwszego rzędu Soundfield SPS-200.*

- Spitsbergen i Svalbard stosuje się zamiennie. Brak konsekwencji w stosowaniu terminu *1 rzęd*;

Str. 33: *wyznaczenia wektora natężenia dźwięku.*

- wyznaczenie wektora mikrofonem ambisonicznym jest wątpliwe, można go co najwyżej szacować lub wyznaczyć wersor;

Str. 40: *z wykorzystaniem opracowanego przez autorów toolboxu SPARTA.*

- toolbox to mało elegancki termin. Lepszy byłby pakiet narzędzi lub oprogramowania;

Str. 61: (...) *HRTF o niższej rozdzielczości. różnice zasadniczo nie przekraczają (...)*

- błąd drukarski;

Str. 78: (...) *dokonano wyznaczenia dookólnych parametrów sali (...)*

- parametry dookólne to zbyt daleko idący skrót myślowy;

Wiele z przedstawionych powyżej uwag jest bardzo mało istotnych z punktu widzenia oceny poprawności pracy lub stanowi podstawę do dyskusji akademickiej na temat bardzo szczegółowych pojęć lub stwierdzeń.

V.

Podsumowując, rozprawa doktorska **mgr. inż. Macieja Jasińskiego** pt.: *Wyznaczanie parametrów akustycznych pomieszczeń z zastosowaniem przestrzennych odpowiedzi impulsowych* przedstawia oryginalne, nowatorskie, metrologiczne rozwiązanie inżynierskie oraz szczegółowo opisane eksperymenty potwierdzające prawdziwość postawionej w pracy tezy. Liczba moich uwag jest niewielka i nie wpływa na ogólną **bardzo dobrą** ocenę pracy pod względem merytorycznym, a usterki dotyczą głównie kwestii edycyjnych i językowych. Stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa spełnia warunki określone w artykule 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2003 r. Nr 65, poz. 595; z 2005 r. Nr 164, poz. 1365, z 2010 r. Nr 96, poz. 620, Nr 182, poz. 1228, z 2011 r. Nr 84, poz. 455). **Wnioskuje do Rady Dyscypliny Automatyki, Elektroniki, Elektrotechniki i Technologii Kosmicznych o dopuszczenie mgr. inż. Macieja Jasińskiego do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych.**

Prof. dr hab. inż. Bożena Kostek, czł. koresp. PAN
Politechnika Gdańska,
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Lab. Akustyki Fonicznej

15.09.2023 r.

Opinia nt. rozprawy doktorskiej mgra inż. Macieja Jasińskiego

pt.: **“Wyznaczanie parametrów akustycznych pomieszczeń z zastosowaniem przestrzennych odpowiedzi impulsowych”**,
wykonanej pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Jana Żery.

1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie sformułowane przez autora

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra inż. **Macieja Jasińskiego** pt.: **“Wyznaczanie parametrów akustycznych pomieszczeń z zastosowaniem przestrzennych odpowiedzi impulsowych”**. Rozprawa wpisuje się bardzo aktualny trend w akustyce, jakim są pomiary i ocena parametrów akustycznych wewnątrz z zastosowaniem przestrzennej odpowiedzi impulsowej. W szczególności dotyczy to wykorzystania mikrofonów ambisonicznych 2. i 3. rzędu. Warto zauważyć, że na jednej z ważniejszych konferencji, tj. **International Conference on Immersive and 3D Audio (I3DA)** w Bolonii w tej tematyce pojawiły się takie właśnie tematy badawcze, np. „Measurements of Room Acoustic with Two Different Methods - A Case Study”, „Ambisonic room impulse responses extrapolation guided by single microphone measurements”, „Discussion of Acoustic and Perceptual Optimization Methods for Measuring Spatial Room Impulse Responses with a Mobile Robotic Platform”, „Reverberation time prediction using diverse models”, „A Generic Reverberation Characterization Metric for Accurate Simulation in Virtual and Augmented Reality Environments”, „Sound field interpolation via sparse plane wave decomposition for 6DoF immersive audio”, „Effects of the types of headphones and sound sources on spatial audio quality”, „Extraction of Ambience Sound from Microphone Array Recordings for Spatialisation” i wiele innych prezentacji związanych z tematem recenzowanej rozprawy. Warto też zauważyć, że doktorant prezentował na tym forum swój współautorski referat pt. “Application of different types of microphones in room impulse response measurement”

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter eksperymentalny, składa się z dziesięciu rozdziałów oraz Bibliografii (112 źródeł). Praca obejmuje 93 stron tekstu, w tym trzy załączniki do pracy: definicje parametrów akustycznych, schematy punktów pomiarowych w pomieszczeniach, analizę wariancji danych. Praca zawiera następujące elementy: streszczenia w j. polskim i angielskim, wstęp, opis parametrów akustycznych pomieszczeń, techniki przetwarzania sygnałów ambisonicznych, opis

funkcji przenoszenia głowy HRTF, przegląd literatury, analizę przestrzennej odpowiedzi impulsowej pomieszczenia, wyniki badań, podsumowanie i dyskusję, wnioski. Ten układ pracy wydaje się trochę nietypowy, a mianowicie przegląd literatury pojawia się dopiero w rozdziale 5., cel i tezy rozprawy w rozdziale 6.

Główny cel rozprawy odnosi się do sprawdzenia możliwości zastosowania mikrofonów ambisonicznych 2. i 3. rzędu do pomiarów kompletnego zestawu parametrów służących ocenie akustycznej pomieszczeń, w szczególności zawartych w normie PN-EN ISO 3382-1 oraz dodatkowo parametrów związanych ze słyszeniem dwuuszynym, tj. międzyuszną korelacją skrośną. Cel ten ma swoje rozwinięcie w postaci użycia funkcji HRTF, binauralnej odpowiedzi impulsowej BRIR oraz porównania skuteczności tej metody z klasycznymi oraz referencyjnymi metodami pomiarów, tj. wykorzystania mikrofonu wszechkierunkowego, manekina akustycznego i sztucznej głowy. Do badań wytypowano sale z różnymi warunkami pogłosowymi, tj. komorę bezechową, komorę pogłosową, średniej wielkości studio nagraniowe, salę koncertową oraz korytarz. Taki wybór badanych wnętrza ma zasadnicze znaczenie, gdyż odnosi się zarówno do pomieszczeń o różnym charakterze i różnych warunkach pogłosowych, jak również o skrajnych wartościach czasu pogłosu.

We Wstępie doktorant wprowadza w tematykę rozprawy, formułuje wstępnie cel rozprawy. W rozdziale 2 doktorant przedstawia parametry akustyczne pomieszczeń, odnosząc się do definicji, kryteriów wyboru oraz metod pomiarowych. Rozdział 3 zawiera zagadnienia związane z konstrukcją i budową mikrofonów przestrzennych (matryc mikrofonowych, mikrofonów ambisonicznych), przetwarzaniem sygnałów ambisonicznych, definicją binauralną (BRIR) oraz przestrzennej odpowiedzi impulsowej (SRIR), pojęciem aliasingu przestrzennego.

Rozdział 4 omawia metody binauralizacji sygnałów ambisonicznych w odniesieniu do możliwości wyznaczenia parametrów akustyki wnętrza. W rozdziale 5 doktorant podał krytyczny przegląd literatury w dwóch aspektach, tj. zastosowania przestrzennych odpowiedzi impulsowych do wyznaczania parametrów akustycznych wnętrza oraz wyznaczania kierunku dochodzenia dźwięku z użyciem sygnałów ambisonicznych.

W rozdziale 6 podana została teza badawcza sformułowana w sposób następujący: **Możliwe jest uzyskanie zestawu parametrów akustycznych pomieszczenia, ze szczególnym uwzględnieniem binauralnych parametrów przestrzennych, za pomocą jednego przetwornika pomiarowego w postaci sferycznej matrycy mikrofonowej o kontrolowanej kierunkowości przy uwzględnieniu niezależnie mierzonych lub modelowanych funkcji HRTF.**

Rozdział 7 jest jednym z dwóch głównym rozdziałów badawczym, w którym została przedstawiona metodologia badań, dotycząca wyznaczania odpowiedzi impulsowych w wersji binauralnej oraz przestrzennej oraz badanych pomieszczeń. Doktorant wykorzystuje algorytmy binauralizacji sygnału ambisonicznego za pomocą metod: najmniejszej sumy kwadratów (Least Squares, LS), Magnitude Least Squares

(MagLS), wyrównania czasowego (Time Alignment, TA) i przepróbkowanie przestrzeni (Spatial Resampling, SPR). Z kolei do wyznaczania funkcji transmitancji HRTF manekina pomiarowego B&K 4100-D wykorzystano modelowanie metodą elementów brzegowych z wykorzystaniem oprogramowania Mesh2HRTF. Rozdział ten zawiera również opis badanych pomieszczeń, a także aparatury pomiarowej. W rozdziale 8 doktorant zawarł wyniki badań, wyznaczając odpowiedzi impulsowe badanych pomieszczeń oraz parametry związane z pogłosem oraz z jakością brzmienia danego wnętrza z dookólnej odpowiedzi impulsowej, parametry związane z przestrzennością dźwięku, jak również analizę szacowania błędu pomiaru mikrofonem ambisonicznym. Rozdział ten stanowi również dowód na poprawność tezy badawczej.

Rozdział 9 stanowi podsumowanie prowadzonych badań, które jest wynikiem dyskusji uzyskanych wyników, zaś w rozdziale 10 przedstawione zostały wnioski ogólne.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym, literatury światowej, stanu wiedzy

Doktorant – co prawda – zawiera przegląd literatury w tytule rozdziału 5, ale rozdziały 2-4 również stanowią przyczynek do stanu wiedzy, gdyż odnoszą się do metod zastosowanych w części eksperymentalnej pracy. Lista źródeł jest obszerna i zawiera 112 pozycji; została uszeregowana w kolejności alfabetycznej. Dobór literatury jest prawidłowy i należy zauważyć, że Doktorantowi znane są opracowania, które są kluczowe dla prowadzenia badań w zakresie tematyki rozprawy doktorskiej. Bibliografia zawiera źródła pochodzące również z ostatnich lat, tj. 2019-2022, w tym kontekście zgromadzona literatura jest aktualna.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia; czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione, czy wykazał umiejętność poprawnego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników

Autor rozprawy przedstawił koncepcję badania parametrów akustycznych pomieszczeń za pomocą wyznaczenia przestrzennej odpowiedzi impulsowej pomieszczenia (SRIR, Spatial Room Impulse Response) i następnie binauralnej odpowiedzi impulsowej pomieszczenia (BRIR, Binaural RIR). Funkcje SRIR i BRIR są wykorzystywane do określenia parametru międzyusznej korelacji skrośnej (IACC, Interaural Cross-Correlation). Pomimo, iż wyznaczanie parametrów wszechkierunkowych za pomocą mikrofonu ambisonicznego nie jest w pełni nową ideą, to jednak istotne jest porównanie tych wyników z pomiarami standardowymi mikrofonem pomiarowym w różnych warunkach akustycznych. Ponadto istotne jest zbadanie odstępstw wartości uzyskanych parametrów akustycznych w stosunku pomiarów przeprowadzonych zgodnie z zaleceniami standardu i wykazanie, że

wartości tych odstępstw nie przekraczają w większości przypadków jednego do dwóch progów postrzegania zmian parametrów akustycznych pomieszczenia wg normy PN-EN ISO 3382-1 (ang. *Just Noticeable Difference*, JND). Jest to bardzo sensowne zastosowanie tej normy do badania różnic w pomierzonych wartościach w stosunku do wartości uzyskanych za pomocą metody referencyjnej.

Przyjęta metodologia jest poprawna, a przedstawienie wyników – przekonujące.

4. Oryginalność rozprawy, jej mocne strony, pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy, przydatność rozprawy dla nauk inżyniersko-technicznych

Jak wcześniej wspomniano, doktorant koncentruje się na wykorzystaniu BRIR do pomiarów akustycznych oraz na porównaniu wyników uzyskanych za pomocą mikrofonu ambisonicznego z wynikami uzyskanymi za pomocą standardowego mikrofonu pomiarowego, co ma potencjalnie istotne implikacje dla obszaru akustyki i badań nad dźwiękiem przestrzennym. W szczególności dotyczy to przestrzenności dźwięku i jakości pola akustycznego w pomieszczeniach takich jak sale koncertowych i audytoria.

Autor rozprawy porównał wyniki pomiarów dla parametru międzyusznej korelacji skróśnej IACC (Interaural Cross-Correlation) uzyskane za pomocą mikrofonów ambisonicznych. Wykazał, że mikrofony Sennheiser Ambeo i Zylia ZM1-3E osiągnęły najmniejsze różnice w stosunku do pomiarów dokonywanych za pomocą manekina akustycznego. Jest to istotne, ponieważ ten parametr jest istotny w ocenie przestrzennego obrazu dźwiękowego.

Doktorant wykazał, że matryca mikrofonowa (mikrofon ambisoniczny) może zastąpić tradycyjne metody pomiarowe, takie jak użycie mikrofonu pomiarowego lub manekina, do pomiarów różnych parametrów akustycznych pomieszczenia. Podejście takie może stanowić uproszczenie procesu pomiarów przestrzennych parametrów akustycznych. Przede wszystkim, zastosowanie mikrofonu ambisonicznego, umożliwia uzyskanie przestrzennej odpowiedzi impulsowej wnętrza, która jest niezbędna do wyznaczenia parametrów związanych z oceną przestrzennością. Najważniejszą korzyścią tej metodologii jest to, że eliminuje ona potrzebę stosowania manekinu pomiarowego, który był wcześniej niezbędny do pomiarów przestrzennych. Wyniki sugerują, że wykorzystanie sztucznej głowy (w zasadzie nie spełnia standardów urządzenia pomiarowego) do pomiarów funkcji IACC może być równie wiarygodne, jak użycie tradycyjnego manekina B&K4100-D. Otwiera to możliwość wykorzystania KU-100 w badaniach akustycznych związanych z dźwiękiem przestrzennym. Dodatkowo, pozwala to na dowolne dostosowanie orientacji ukierunkowania na źródło dźwięku bez konieczności powtarzania pomiarów. Dzięki temu, proces pomiarów staje się bardziej efektywny, co może mieć znaczący wpływ na obszar związany z wyznaczaniem przestrzennych parametrów akustycznych pomieszczeń.

Jak wcześniej wspomniano, autor rozprawy wykazał, że wyniki pomiarów funkcji IACC (Interaural Cross-Correlation) uzyskane za pomocą manekina B&K4100-D i sztucznej głowy KU-100 są praktycznie identyczne, a więc w praktyce nie ma znaczących różnic między wynikami uzyskanymi za pomocą tych dwóch różnych narzędzi pomiarowych. Jest to kolejny istotny wniosek, ponieważ potwierdza, że sztuczna głowa może być używana jako alternatywa w badaniach dźwięku przestrzennego rejestrowanego mikrofonami ambisonicznymi.

Doktorant stwierdził, że wybór metody, która upraszcza funkcję HRTF (Head-Related Transfer Function) jest skomplikowany i zależy od wielu czynników, w tym od rodzaju i rzędu mikrofonu oraz rozdzielczości przestrzennej funkcji HRTF. Wniosek ten wskazuje, że wybór odpowiedniej metody uproszczającej jest istotny w procesie pomiarowym.

Doktorant przeprowadził uproszczoną ocenę dokładności mikrofonów ambisonicznych Sennheiser Ambeo i Zylia ZM1-3E, wskazując, że dokładność w odniesieniu do amplitud odbić w sali nie jest mniejsza niż 2,7 dB. Informacja ta pozwala na określenie granic dokładności stosowania tych mikrofonów.

W powyższym kontekście można stwierdzić, że teza pracy sformułowana jako: „Możliwe jest uzyskanie parametrów akustycznych pomieszczenia przy uwzględnieniu binauralnych parametrów przestrzennych, za pomocą sferycznej matrycy mikrofonowej przy uwzględnieniu funkcji HRTF została wykazana.

Autor potwierdził tezę pracy, która mówi, że **„Możliwe jest uzyskanie zestawu parametrów akustycznych pomieszczenia, ze szczególnym uwzględnieniem binauralnych parametrów przestrzennych, za pomocą jednego przetwornika pomiarowego w postaci sferycznej matrycy mikrofonowej o kontrolowanej kierunkowości przy uwzględnieniu niezależnie mierzonych lub modelowanych funkcji HRTF”**. Jest to kluczowy wniosek, który wskazuje na możliwość skutecznego zastosowania mikrofonów ambisonicznych w pomiarach akustyki wnętrz.

Na podstawie wyników, ale też doświadczenia uzyskanego podczas realizacji badań, doktorant wskazał na potrzebę rozwoju zaproponowanej metodologii. Jednym z kierunków jest badanie mikrofonów ambisonicznych o rzędzie wyższym niż trzy. Autor rozprawy sugeruje wykorzystanie operacji opartych na harmonikach sferycznych (ang. *upscaling*) w celu poprawy dokładności pomiarów. Ważna jest też kontynuacja badań związanych z uproszczeniem rozdzielczości funkcji przestrzennej HRTF (Head-Related Transfer Function) przy użyciu różnych rzędów harmonik sferycznych. W moim odczuciu, jednak najważniejszym aspektem jest rozwinięcie metody kalibracji mikrofonów ambisonicznych właśnie w kontekście pomiarów akustycznych.

Rozprawa ma charakter badawczy, aktualność tematyki rozprawy jest potwierdzona przez źródła literaturowe oraz technologie. Prowadzone badania wpisują się w dyscyplinę, w której doktoryzuje się p. **Maciej Jasiński**. Szczególnie

istotny jest aspekt aplikacyjny rozprawy doktorskiej, uzyskane wyniki mogą stać się przyczynkiem do wprowadzenia nowych metod pomiarów akustyki wnętrza.

Warto też zauważyć, że obecnie binauralna odpowiedź impulsowa BRIR jest głównie stosowana w systemach rozszerzonej rzeczywistości w połączeniu z dźwiękiem przestrzennym. Niemniej jednak, obserwuje się rosnące zainteresowanie badaczy nad modyfikacją zarówno BRIR, jak i HRIR (Head-Related Impulse Response) w kontekście zastosowania tych funkcji w badaniach akustycznych, co świadczy o aktualności tematyki rozprawy.

Podsumowując, autor pracy przeprowadził kompleksowe badania nad wykorzystaniem mikrofonów ambisonicznych w pomiarach akustycznych pomieszczeń, potwierdzając ich przydatność i dokładność szczególnie w kontekście przestrzennych pomiarów akustycznych. Wynik tych prac może stanowić ważny wkład w połączonych obszarach pomiarów akustyki i rejestracji dźwięku przestrzennego i dobrze wpisuje się w nauki inżynierjno-techniczne oraz dyscyplinę naukową.

Uwagi do dyskusji:

1. Czy istnieje standardowa metoda kalibracji tego typu przetwornika (mikrofon ambisoniczny). Czy autor rozprawy mógłby zaproponować własną metodę na podstawie doświadczeń z badań?
2. Czy autor rozprawy mógłby się pokusić o propozycje nowych parametrów lub zaproponować nowe definicje parametrów, które są ściśle skorelowane z parametrami przestrzennymi oceny jakości wnętrza uzyskanymi pośrednio z przestrzennej odp. impulsowej (SRIR)?
3. Czy tego typu metodyka badań jest uniwersalna w kontekście projekcji różnych sygnałów fonicznych (doktorant wyznacza wskaźnik czytelności C50) czy ma główne zastosowanie do oceny jakości muzyki we wnętrzu?
4. Czy przykład metody oszacowania błędu pomiarowego (niepewności pomiaru) mógłby posłużyć do wyznaczenia nowych miar błędu?
5. W jakim stopniu zjawisko aliasingu przestrzennego w przypadku wykorzystywanych mikrofonów (i wynikająca z niego częstotliwość graniczna) ogranicza proponowaną metodę pomiarową? Czy oprócz zastosowanych metod pozwalających na minimalizację błędu związanego z ograniczaniem rzędu harmonik sferycznych funkcji przenoszenia głowy HRTF dla wyznaczania parametru IACC doktorant widzi inne podejścia?
6. Typowo, w końcowym rozdziale obejmującym podsumowanie badań zarysowane są plany na dalsze kierunki badań. Tak też jest w przypadku recenzowanej pracy. Czy doktorant mógłby rozwinąć przedstawione plany, zwłaszcza, że badania akustyki wnętrza na podstawie przestrzennych odpowiedzi impulsowych są tematem rozwojowym, a ponadto mogą być wykorzystywane w wielu zastosowaniach.

7. W szczególności można zauważyć kierunki prac związane z przestrzennością dźwięku wykorzystujące uczenie maszynowe (Amengual Garí, S., Robinson, P., Calamia P., Room acoustic characterization for binaural rendering: From spatial room impulse responses to deep learning, Conference: International Congress on Acoustics, October 2022). Co prawda dotyczy to przede wszystkim odtwarzania wiarygodnej propagacji dźwięku w rzeczywistości rozszerzonej (Augmented Reality) i tworzenia przekonującej auralizacji. W celu osiągnięcia tego celu, konieczne jest dopasowanie właściwości akustycznych sygnałów wirtualnych do tych występujących w przestrzeni, w której użytkownik się znajduje. Punktem wyjściowym są techniki "Blind Parameter Estimation" (BPE) i "Blind System Identification" (BSI), które pozwalają na uzyskanie parametrów akustycznych pomieszczenia i przybliżonej odpowiedzi impulsowej pomieszczenia (RIR) za pomocą już istniejących źródeł dźwięku w otoczeniu. W omawianym podejściu metody uczenia maszynowego (wykorzystujące modele głębokie) stosowane są w celu rekonstrukcji geometrii i identyfikacji materiałów w scenie wirtualnej, dzięki czemu można bezpośrednio tworzyć modele akustyczne potrzebne do generowania dźwięku. Autorzy cytowanej powyżej pracy starają się ominąć konieczność bezpośredniego oszacowania akustyki poprzez bezpośrednie wbudowanie właściwości akustycznych przestrzeni w dowolny sygnał. Czy autor rozprawy mógłby skomentować, w jakim stopniu metody pomiarowe związane z badaniem parametrów akustycznych, w tym przestrzenności mogłyby wspomóc takie podejście.

Uwagi natury edycyjnej (głównie dotyczy bibliografii)

Jak wcześniej wspomniano, układ pracy jest niestandardowy, gdyż rozdział zawierający cel i tezy pracy (taki jest tytuł rozdziału) pojawia się w rozdziale 6. Dobrze jednak, że doktorant zarysował cel badań oraz zakres rozprawy we Wstępie. Rozdziały 2-4 zawierają odniesienie do podstaw pomiarów akustyki wnętrza, zaś rozdział 5 nosi tytuł: przegląd stanu wiedzy (w kontekście zaproponowanej tezy badawczej). Pomimo wspomnianego nietypowego układu pracy, ma ona logiczną strukturę. Wyniki badań zostały przedstawione w sposób zwięzły. Praca jest poprawna od strony redakcyjnej, edycja rozprawy jest dość staranna, chociaż zdarzają się różne usterki (głównie w stosowaniu apostrofu w nazwiskach zagranicznych).

Podsumowanie i dyskusja oraz wnioski są oddzielnymi rozdziałami, zwykle dyskusja i wnioski są jednym rozdziałem, zaś Podsumowanie i dalszy rozwój badań – finalnym.

W pracy brakuje listy rysunków, tabel oraz wykazu ważniejszych skrótów, w tym odniesienia do symboli i oznaczeń matematycznych,

W niektórych pozycjach brakuje pełnych danych bibliograficznych, np.:

Brinkmann, F. *et al.*, "Recent Advances in an Open Software for Numerical HRTF Calculation," *Journal Audio Engineering Society*, , vol. (w druku), 2023.

Właściwy zapis: F. Brinkmann, W. Kreuzer, J. Thomsen, S. Dombrovskis, K. Pollack, S. Weinzierl and P. Majdak, "Recent Advances in an Open Software for Numerical HRTF Calculation" *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 71, no. 7/8, pp. 502–514, (2023 July/August). DOI: <https://doi.org/10.17743/jaes.2022.0078>

Brakuje informacji dotyczących dat i miejsc konferencji, doi przy nowszych pozycjach bibliografii, itp.

Podsumowanie

W podsumowaniu stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska p. **Macieja Jasińskiego spełnia z wyraźnym nadmiarem wymagania** stawiane rozprawom doktorskim w aktualnie obowiązującej Ustawie o stopniach i tytule naukowym. W związku z tym wnoszę o **dopuszczenie rozprawy doktorskiej p. mgra inż. Macieja Jasińskiego do publicznej obrony.**

Ze względu na osiągnięte w rozprawie wyniki, w szczególności dotyczących analizy odstępstw w pomiarach parametrów akustyki wnętrza oraz opublikowanie tych wyników w recenzowanych czasopismach oraz na prestiżowych konferencjach tematycznych – **wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.**



prof. dr hab. inż. Andrzej Dobrucki
emerytowany pracownik
Politechniki Wrocławskiej

ul. Olsztyńska 36

51-423 Wrocław

tel. 609 226789

e-mail: andrzej.dobrucki@pwr.edu.pl

WPŁYNĘŁO
2023 -10- 25
dn.....

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja JASIŃSKIEGO
pt. „Wyznaczanie parametrów akustycznych pomieszczeń z zastosowaniem przestrzennych
odpowiedzi impulsowych”

Podstawą wykonania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej z dnia 26 czerwca 2023. Tematyka rozprawy doktorskiej mieści się w zakresie tematycznym ww. dyscypliny. Praca została wykonana w Zakładzie Elektroakustyki Politechniki Warszawskiej. Promotorem rozprawy był prof. dr hab. inż. Jan Żera.

Rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Jasińskiego liczy 93 strony. Jest ona podzielona na 9 rozdziałów, ponadto zawiera streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz bibliografii oraz 3 dodatki. W rozprawie znajdują się 34 rysunki w tekście głównym oraz 4 w dodatku Z2 oraz 8 tabel, z czego 5 w tekście głównym oraz 3 w dodatku Z3. W bibliografii Autor umieścił 112 pozycji, wśród których znajdują się 2 pozycje Autora rozprawy, napisane wspólnie z Promotorem.

Celem pracy było zbadanie możliwości zastąpienia klasycznych pomiarów parametrów akustycznych pomieszczeń przeprowadzaniu przy użyciu wszechkierunkowych mikrofonów pomiarowych pomiarami z użyciem mikrofonów ambisonicznych. Ambisonia stanowi raczej technikę nagrywania dźwięku, tak aby można było odtworzyć jego właściwości przestrzenne i raczej rzadko jest stosowana do pomiarów. Z tego powodu należy uznać pomysł Autora jako świeży i niosący znaczny potencjał naukowy i praktyczny. Technikom ambisonicznym poświęca się ostatnio dużo miejsca w literaturze. Ja sam w ubiegłym roku recenzowałem pracę doktorską, w której Autorka wykorzystywała ambisonię do badań subiektywnego spostrzegania przemieszczania źródeł dźwięku. Cel recenzowanej pracy oraz jej zakres został sformułowany we wstępie, który stanowi Rozdział 1 rozprawy. Mierzone parametry akustyczne pomieszczeń można z grubsza podzielić na dwie grupy. Pierwszą z nich stanowią klasyczne parametry pogłosowe, takie jak czasy pogłosu T60 i T30, wczesny czas pogłosu EDT, czytelność i przejrzystość dźwięku C50 i C80, czas środkowy echogramu T_s i inne, które wyznacza się w danym punkcie pomieszczenia z użyciem jednego dookólnego mikrofonu pomiarowego. Drugą grupę stanowią parametry przestrzenne, z których najważniejsza jest międzyuszną korelacja skrośna IACC, na podstawie której można wyznaczyć cały zestaw parametrów przestrzennych. Do wyznaczenia IACC potrzebny jest pomiar przestrzennej odpowiedzi impulsowej SRIR oraz transmitancji odniesionej do głowy HRTF (lub jej odpowiednika w dziedzinie czasu HRIR). Przestrzenną odpowiedź impulsową SRIR uzyskuje się w sposób podobny jak zwykłą odpowiedź impulsową, tyle że poprzez rejestrację we wszystkich kanałach mikrofonu ambisonicznego. Na podstawie SRIR oraz HRTF można wyznaczyć binauralną odpowiedź impulsową BRIR. Do wyznaczenia HRTF metodą

klasyczną, oprócz pary mikrofonów pomiarowych używa się sztucznej głowy lub manekina głowy i torsu, charakteryzujących wpływ obecności słuchacza na pole akustyczne w pomieszczeniu.

W rozdziale 2 Autor omawia parametry akustyczne pomieszczeń przedstawione pokrótce w rozdziale 1 oraz metody ich pomiaru. Opisuje parametry, które można wyznaczyć za pomocą IACC. Ważną częścią tego rozdziału jest przedstawienie progów zauważalności różnic poszczególnych parametrów. Będzie to miało znaczenie w dalszej części pracy. Bardzo skrótowo przedstawione są metody pomiaru odpowiedzi impulsowej pomieszczenia z użyciem tonu przestrzajanego oraz metody korelacyjnej MLS. Generalnie, rozdział ten został opracowany na podstawie literatury.

W kolejnym 3 rozdziale opisane są techniki przetwarzania sygnałów ambisonicznych. Zdefiniowano pojęcie ambisonii i opisano sposób rozkładu sygnału przestrzennego na harmoniki sferyczne. Opisano mikrofony ambisoniczne jako szczególny rodzaj matryc mikrofonowych. Zdefiniowano wreszcie rząd i stopień harmonik sferycznych. Opisano sposób przetwarzania sygnałów uzyskanych z poszczególnych mikrofonów matrycy sygnału (tzw. format A) na harmoniki sferyczne (format B). Teoretycznie, rozkład sygnału przestrzennego na harmoniki sferyczne jest wariantem rozkładu na szereg Fouriera, przy czym jako bazę ortogonalną stosuje się wielomiany Legendre'a i stowarzyszone funkcje Legendre'a. Szereg ten jest zwykle nieskończony, tzn. rząd harmonik sferycznych zmienia się od 0 do nieskończoności. Ze względów praktycznych (np. wymiary matrycy mikrofonowej) rząd ten jest ograniczony, najczęściej do wartości 1 lub 3. Do swoich badań Autor użył matryc 1 rzędu Sennheiser Ambeo oraz matryc 3 rzędu Zylia. Autor omawia też zjawisko aliasingu przestrzennego, które ogranicza pasmo przetwarzanych częstotliwości. Rozdział 3 jest opracowany w całości również na podstawie doniesień literaturowych.

W rozdziale 4 przedstawione są zagadnienia związane z wyznaczaniem HRTF, czyli funkcji przeniesienia głowy. Trzeba podkreślić, że jest to wielkość indywidualna dla każdego osobnika. Stosowanie HRTF np. do słuchowej lokalizacji źródeł dźwięku lub do wyznaczania spostrzegania minimalnych przemieszczeń źródła dźwięku jest znacznie dokładniejsze, jeśli zastosuje się indywidualną HRTF danej osoby. W przypadkach nie wymagających takiej dokładności, można użyć HRTF z którejś bazy danych. Celem rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Jasińskiego jest wyznaczanie parametrów akustycznych pomieszczeń. Z tego względu pomiary muszą być powtarzalne i niezależne od cech indywidualnych. Do wyznaczenia parametru przestrzennego IACC stosuje się więc HRTF znormalizowanego manekina symulującego głowę i tors (np. HATS produkcji firmy B&K) lub sztucznej głowy (w rozprawie użyto sztuczną głowę KU-100 firmy Neumann. Autor w swoich badaniach używał obu tych symulatorów. W literaturze stwierdzono, że funkcje HRTF rozłożone na harmoniki sferyczne niosą istotną informację, aż do 30 rzędu, matryca mikrofonowa zawierałaby wtedy 961 mikrofonów. Jeśli się więc używa mikrofonów ambisonicznych pierwszego lub trzeciego rzędu, powstają znaczne zniekształcenia sygnału. Autor omawia 4 metody minimalizacji tych zniekształceń i związanych z nimi błędów. Metody te występują w literaturze przedmiotu. W dalszym ciągu pracy doktorskiej Autor przetestował wszystkie te metody pod kątem zastosowania do wyznaczania parametrów akustycznych pomieszczeń. Rozdział 4 też został opracowany na podstawie literatury.

Rozdział 5 stanowi przegląd literatury. Uwzględniono w nim cytowane pozycje związane z tematyką pracy. Przegląd podzielono na trzy części: literatura dotycząca wyznaczania parametrów pomieszczeń z zastosowaniem przestrzennych odpowiedzi

impulsowych, literatura dotycząca wyznaczania kierunku dochodzenia dźwięku z udziałem rozkładu sygnałów na harmoniki sferyczne oraz literatura dotycząca zagadnień binauralizacji.

Od rozdziału 6 zaczyna się zasadnicza część rozprawy, obejmująca badania własne Autora. W rozdziale 6 sformułowano cel, tezę i zakres pracy. Wprawdzie cel i zakres pracy były przedstawiony wcześniej, głównie we Wstępie, to tu nastąpiło ściśle ich zdefiniowanie. Sformułowana teza rozprawy jest następująca:

„Możliwe jest uzyskanie zestawu parametrów akustycznych pomieszczenia, ze szczególnym uwzględnieniem binauralnych parametrów przestrzennych, za pomocą jednego przetwornika pomiarowego w postaci sferycznej matrycy mikrofonowej o kontrolowanej kierunkowości przy uwzględnieniu niezależnie mierzonych lub modelowanych funkcji HRTF.” Teza jest sformułowana prawidłowo, wskazuje jakie istotne zagadnienie badawcze obejmuje rozprawa i jaki jest jej ostateczny wynik.

W rozdziale 7 opisano metodykę badań, mierzone wielkości i sposób ich pomiaru, a także użytą aparaturę. W szczególności wskazano, że do badań użyto mikrofonów ambisonicznych: mikrofonu rzędu pierwszego Ambeo firmy Sennheiser oraz rzędu trzeciego firmy Zylia. Ponieważ, jak już podano wcześniej, są to mikrofony niskich rzędów, do prawidłowej binauralizacji sygnałów konieczna jest kompensacja błędów. Przetestowano cztery algorytmy:

- Least Squares (LS),
- Magnitude Least Squares (MagLS),
- Time Alignment (TA),
- Spatial Resampling (SPR)

Następnie opisano sposoby wyznaczenia funkcji HRTF. Do badań użyto manekina firmy Brüel&Kjaer oraz sztucznej głowy KU-100 firmy Neumann. Dla manekina funkcje HRTF wyznaczono numerycznie poprzez jej precyzyjne zeskanowanie i triangulację. Dla sztucznej głowy funkcję HRTF pobrano z bazy SADIE-II. Zbadano dwa warianty: z gęstą siatką obejmującą 8802 punkty, oraz siatkę rzadszą zawierającą 1550 punktów. Siatki o tych gęstościach zastosowano też do obliczeń HRTF manekina B&K. Przedstawiono badane pomieszczenia. Były to:

- Komora bezechowa Zakładu Elektroakustyki PW,
- Korytarz Gmachu Elektroniki PW,
- Studio dźwiękowe Zakładu Elektroakustyki,
- Sala koncertowa Filharmonii Pomorskiej w Bydgoszczy,
- Komora pogłosowa Instytutu Techniki Budowlanej.

Jak widać badane pomieszczenia charakteryzowały się skrajnymi właściwościami akustycznymi, dostosowanymi do ich funkcji użytkowych.

Podano, też, z jakiej aparatury pomiarowej korzystano. Oprócz wskazanych powyżej mikrofonów ambisonicznych, manekina i sztucznej głowy stosowano też wszechkierunkowe mikrofony pomiarowe, wszechkierunkowe źródło dźwięku B&K, odpowiednie interfejsy i oprogramowanie.

Zasadniczym rozdziałem rozprawy jest rozdział 8, przedstawiający wyniki badań. Jest to również rozdział najdłuższy, obejmujący ok 30% rozprawy. W pierwszej części tego rozdziału Doktorant przedstawia metodę obserwacji echogramów kierunkowych. Na trójwymiarowym wykresie przedstawione są amplitudy poszczególnych odbić i kierunki ich

dochodzenia. Aby określić czasy dojścia, należy przedstawiać echogramy wykreślane w odpowiednich przedziałach czasu. Jest to sposób bardzo obrazowy, ale niewygodny do analizy, przez co ten sposób nie był w dalszym ciągu pracy wykorzystywany. W kolejnym podrozdziale przedstawiony jest sposób wykreślenia echogramów w funkcji czasu dojścia poszczególnych odbić dla poszczególnych analizowanych pomieszczeń. Jako echogramy referencyjne do dalszych analiz przyjęto echogramy uzyskane za pomocą mikrofonu pomiarowego. Porównuje się je z echogramami uzyskanymi za pomocą kanału W (wszechkierunkowego) mikrofonów ambisonicznych. Wyniki uzyskane za pomocą mikrofonów ambisonicznych są podobne do wyników referencyjnych, chociaż występują pewne różnice. Autor ogranicza się do stwierdzenia faktu i rodzaju tych różnic, bez wnikania w ich przyczyny. Wyniki są takie, jakich należałoby się spodziewać. Dla komory bezechowej zmniejszanie się amplitudy echogramów w czasie następuje bardzo szybko, dla komory pogłosowej zaś – bardzo wolno. Ciekawe są wyniki dla dużej sali koncertowej. Wyraźnie widać moment dotarcia do mikrofonu pierwszego odbicia. W podrozdziale 3 przedstawione są wyniki obliczeń pogłosowych parametrów akustycznych, takich jak czas pogłosu T_{30} , czas wczesnego zaniku EDT, czytelność dźwięku C50, przejrzystość C80 i czas środkowy T_s . Parametry te obliczono dla wszystkich badanych pomieszczeń i z użyciem mikrofonu pomiarowego i kanałów W obu mikrofonów ambisonicznych: Ambeo i Zylia. Różnice wyników rzadko przekraczają wartości JND (just noticeable difference) – ledwie zauważalnych różnic. Największe różnice występują dla komory bezechowej. Jest to związane z dużym błędem określania czasów zaniku, które są bardzo małe. Narzuca się tu wniosek, że określanie parametrów pogłosowych pomieszczeń daje zgodne wyniki dla mikrofonów ambisonicznych i standardowych mikrofonów pomiarowych, w związku z czym, jeśli ograniczamy się do pomiaru tych parametrów nie ma potrzeby stosowania mikrofonów ambisonicznych.

W kolejnym podrozdziale rozdziału 8 przedstawiono wyniki pomiaru międzyuszej korelacji skróśnej IACC. Jest to wg mnie zasadniczy punkt rozprawy, ponieważ IACC jest parametrem przestrzennym, wymagającym oprócz pary mikrofonów (w metodzie standardowej) również manekina lub sztucznej głowy. Wyniki mogą mocno zależeć od wybranej metody pomiarowej. Wynik badania referencyjnego przedstawione są na rys 8.20. Z wyjątkiem komory bezechowej, dla której w całym paśmie częstotliwości wartość IACC wynosi prawie 1, wartości IACC pomieszczeń mają podobny przebieg. Dla małych częstotliwości, $f \leq 250$ Hz, wartość IACC jest duża bądź bardzo duża. Dla większych częstotliwości szybko ona spada. Nie ma specjalnie dużych różnic między wynikami dla manekina i dla sztucznej głowy. Niska wartość IACC skorelowana jest ze spostrzeganiem przestrzenności dźwięku i określaniem kierunku. Zdecydowanie większe różnice występują przy określaniu parametru IACC sal z użyciem mikrofonów ambisonicznych w porównaniu do wartości IACC uzyskanych za pomocą mikrofonów pomiarowych. Przetestowano też wyniki z użyciem opisanych wyżej metod binauralizacji do tworzenia uproszczonych przebiegów HRTF. Występują też duże różnice między wynikami uzyskanymi dla różnych wartości rozdzielczości siatki – małej 1550 punktów i dużej 8802 punkty. Wyniki różnią się też dla mikrofonów ambisonicznych 1 rzędu (Sennheiser Ambeo) i 3 rzędu (Zylia). Największe różnice występują dla częstotliwości małych i średnich, ale dla niektórych przypadków również dla dużych częstotliwości są znaczne różnice. Analizę niepewności pomiaru i wpływu na nią wielu czynników przedstawiono w podrozdziale 8.4. Największą rolę w bilansie niepewności odgrywa kierunkowość źródła. Autor obliczył niepewności pomiarowe matryc ambisonicznych składających się z 4 i 19 mikrofonów (odpowiednio rząd 1 i 3). Obliczenia

wykończono dla dwóch przypadków: założonej niepewności pojedynczego mikrofonu równej odpowiednio 0,6 dB i 1,1 dB. Te niepewności dotyczą matryc składających się z mikrofonów pomiarowych oraz matryc składających się z mniej dokładnych mikrofonów. Jak należało się spodziewać, niepewność rośnie wraz ze wzrostem niepewności pojedynczego mikrofonu oraz ze wzrostem liczby mikrofonów.

W rozdziale 9 rozprawy, doktorant przeprowadził dyskusję wykładową. Jest ona o tyle ważna, że w rozdziale 8 ograniczono się do wskazania różnic występujących między wynikami uzyskanymi w różnych warunkach, natomiast raczej mało jest wyjaśnień, skąd te różnice się biorą. W rozdziale 9 Autor podjął próbę wyjaśnienia przyczyn różnic. Podjęcie tematu użycia mikrofonów ambisonicznych, a konkretnie kanału W tych mikrofonów, do pomiaru parametrów pogłosowych pomieszczenia, wzięło się stąd, że w literaturze w zasadzie problem ten nie jest poruszany. Uzyskano dobrą zgodność między wynikami uzyskanymi za pomocą mikrofonów ambisonicznych a wynikami pomiaru uzyskanymi metodą klasyczną z użyciem mikrofonu pomiarowego. Nie jest to dla mnie niespodzianką, ponieważ kanał W mikrofonów ambisonicznych jest właściwie mikrofonem o dookólnej charakterystyce kierunkowości. Autor potwierdził tylko intuicyjne przypuszczenie.

Większe znaczenie ma porównanie wyników parametru IACC, charakteryzującego właściwości przestrzenne dźwięku w pomieszczeniu, uzyskane za pomocą mikrofonów ambisonicznych z wynikami uzyskanymi za pomocą mikrofonów pomiarowych i manekina akustycznego lub sztucznej głowy. Tutaj użycie mikrofonu ambisonicznego jest celowe o tyle, że używa się rzeczywiście przestrzennych rozkładów na harmoniki sferyczne. Zastosowanie mikrofonów ambisonicznych wymagało zbadania wpływu rozdzielczości określania HRTF a także metody upraszczania określania HRTF z użyciem niskich rzędów ambisonii. To zbadanie jest niewątpliwym osiągnięciem Autora rozprawy. Niestety, w większości przypadków różnice IACC określonych metodą standardową oraz metodami z użyciem ambisonii różnią się dosyć znacznie. Różnice wystąpiły dla wszystkich badanych pomieszczeń. Autor podkreśla, że różnice te nie występowały w całym paśmie częstotliwości, ale dla pojedynczych częstotliwości. Jednakże nie ma jakiejś systematyki wpływu sali, wpływu metody określania BRIR oraz częstotliwości na wynik pomiarów. Różnice te są większe dla mikrofonu Zylia ZM1-3E niż dla mikrofonu Ambeo. Autor porównał wyniki uzyskane w rozprawie z wynikami literaturowymi. Odnosi się wrażenie, że rozprawa jest kolejną pracą, na podstawie której nie da się określić jednoznacznie przydatności ambisonii do określania parametru IACC. We wnioskach z rozprawy (rozdział 10), Doktorant pisze, że różnice określania BRIR na podstawie zastosowania mikrofonów ambisonicznych są najmniejsze w przypadkach:

- zastosowania mikrofonu 1 rzędu Sennheiser Ambeo, przy uproszczeniu rzędu HRTF o rozdzielczości 8802 punktów metodami Magnitude Least Squares (MagLS) lub Spatial Resampling (SPR),

- zastosowania mikrofonu 3 rzędu Zylia ZM1-3E, przy uproszczeniu rzędu HRTF o rozdzielczości 1550 punktów metodą Spatial Resampling (SPR).

Rzeczywiście są one najmniejsze, ale jednak ciągle duże, co stawia znak zapytania nad metrologicznymi właściwościami przeprowadzenia pomiarów za pomocą mikrofonów ambisonicznych.

W dalszym ciągu Autor deklaruje udowodnienie postawionej w rozdziale 6 tezy.

Jak zaletę metody ambisonicznej Autor wskazuje, że pomiar można przeprowadzić za pomocą jednego urządzenia – mikrofonu ambisonicznego, w miejsce pomiaru parametrów pogłosowych za pomocą mikrofonu pomiarowego, a parametrów przestrzennych – za

pomocą sztucznej głowy lub manekina akustycznego. Należy jednak zastrzec się, że zastosowanie mikrofonu ambisonicznego w tym drugim przypadku jest dość kłopotliwe, ponieważ należy wybrać odpowiednią metodę kompensacji błędów określania HRTF i określoną rozdzielczość siatki, co nie jest jednakowe dla wszystkich pomiarów i chyba na obecnym etapie nie da się jednoznacznie określić. Tak więc deklarację udowodnienia tezy należy opatrzyć powyższymi zastrzeżeniami. Zaletą rozprawy jest jednak zbadanie możliwości i sformułowanie tych zastrzeżeń. Zostały one zresztą sformułowane przez Autora na ostatniej stronie zasadniczego tekstu, rozprawy.

Struktura pracy jest dosyć oryginalna. Pierwsze rozdziały poświęcone są opisom zagadnień związanych z tematyką rozprawy, ale jednak wtórnych. Część „autorska” rozprawy pojawia się dopiero w rozdziale 6, na str. 3. Biorąc pod uwagę, że cała praca (bez wykazu literatury i dodatków) liczy 79 stron, część dotycząca rozważań nad stanem wiedzy stanowi prawie połowę pracy. Niektóre zagadnienia poruszanych w części I pracy, np.: metody binauralizacji sygnałów ambisonicznych oceniane pod kątem wyznaczania parametrów akustycznych pomieszczenia są niezbędne i wykorzystywane w dalszym ciągu pracy. Wydaje mi się jednak, że ta część I mogłaby zostać skrócona. Rozprawa doktorska jest pracą naukową, przeznaczoną dla osób zorientowanych w temacie i nie musi szczegółowo wyjaśniać wszystkich zagadnień.

Rozprawa jest zredagowana dość niestarannie. Występują w niej dość liczne błędy literówki, których tu nie będę wymieniał. Tak samo, styl rozprawy nie jest najlepszy. Autor jest niekonsekwentny w używaniu apostrofu przy odmianie nazwisk obcych. Reguła jest taka, że apostrofu używa się przy odmianie nazwisk kończących się literą „e” nieme, np. Laplace – Laplace’a, natomiast nie używa się w innych przypadkach: np. Fourier - Fouriera. Z tego względu odmiana „Gerzon’a (str. 16 i str. 30) jest błędna, natomiast „Gerzona” (też str. 30) – prawidłowa. Znalazłem też dwie pomyłki merytoryczne. Na str. 9 w ostatnim wierszu Autor pisze, że „określenie go (czasu pogłosu) jako spadek ciśnienia akustycznego milion razy, czyli o 60 dB”. Tymczasem 60 dB odpowiada spadkowi ciśnienia akustycznego (wartości skutecznej) tysiąc razy, natomiast milion razy spada wówczas natężenie dźwięku. Na str. 87 we wzorze (Z1.3) podana jest definicja IACF:

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) p_R(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t) dt}}$$

W mianowniku pod pierwiastkiem brakuje tu kwadratów. Powinno być:

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) p_R(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t) dt}}$$

Autor stosuje tu na oznaczenie prawej strony litery „R” (right), natomiast w objaśnieniach do wzoru – literę „P” (prawy). Ta niekonsekwencja występuje również w innych miejscach.

Mimo zauważonych usterek uważam, że praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę. Autor podjął ciekawy temat o charakterze badawczym. W literaturze kwestia przeprowadzenia pomiarów parametrów akustycznych

pomieszczeń z użyciem ambisonii jest dyskutowana i nierozstrzygnięta. Rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Jasińskiego stanowi kolejny, ważny krok na drodze do rozstrzygnięcia postawionego celu: użycia pojedynczego mikrofonu (ambisonicznego) do wykonania pomiarów parametrów akustycznych - zarówno pogłosowych, jak i przestrzennych.

Z tego względu rozprawę doktorską mgr. inż. Macieja Jasińskiego pt. „Wyznaczanie parametrów akustycznych pomieszczeń z zastosowaniem przestrzennych odpowiedzi impulsowych” zaliczam do kategorii „spełniająca wymagania” wg skali ocen przedstawionej w zaleceniach dla recenzentów.

Andrzej Dobrucki

Wrocław, 19.10.2023

