

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 bezdechowej 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:** *wskaznika 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:** *przestrzajany tonem*

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

**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 rząd*;

**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.**