

dr hab. inż. Józef Kotus, prof. PG
Katedra Systemów Multimedialnych
Wydział Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska
Ul. Narutowicza 11/12
jozkotus@pg.edu.pl

Gdańsk 18.10.2022

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Michała Raczyńskiego
„Wyznaczanie natężenia dźwięku
na podstawie
synchronizowanych przebiegów ciśnienia akustycznego”

Problem badawczy objęty zakresem rozprawy

Tematem przekazanej do recenzji rozprawy doktorskiej autorstwa pana mgr inż. Michała Raczyńskiego jest wyznaczenie natężenia dźwięku na podstawie synchronizowanych przebiegów ciśnienia akustycznego. Tematyka rozprawy dotyczy zatem zagadnień związanych z pomiarem natężenia dźwięku. Praca ma charakter teoretyczno-eksperymentalny. Autor dowodzi, że choć od sformułowania pojęcia natężenia dźwięku minęło już blisko 150 lat, to wciąż możliwe jest proponowanie nowego spojrzenia na to zagadnienie. Objawia się w tym w pełni piękno nauki, że można wytyczać nowe szlaki, pomimo istnienia utartych ścieżek. Umiejętność spojrzenia na problem z innej niż dotychczasowa perspektywy to cenna, pożądana i oczekiwana umiejętność, szczególnie w świecie nauki. Przedłożona do recenzji praca jest dowodem, że doktorant tę umiejętność posiada.

Pomiary natężenia dźwięku mają szerokie zastosowanie w nauce, przemyśle i życiu codziennym. Umożliwiają bezpośrednią obserwację rozptyłu energii akustycznej wokół źródeł. Pomimo swojej użyteczności praktyczne pomiary natężenia dźwięku napotykają na istotne ograniczenie, jakim jest konieczność stosowania kosztownych rozwiązań sprzętowych. Jest to jedna z istotnych barier w szerokim upowszechnieniu technik natężeniowych. Doktorant w swojej rozprawie proponuje podejście, które częściowo przełamuje tę barierę. Z tego względu uważam podjętą pracę za aktualną i wartościową.

Ocena organizacji rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska składa się z 10 rozdziałów, spisu rysunków, tabel, bibliografii oraz wstępu i wykazu ważniejszych oznaczeń i akronimów. Praca łącznie liczy 170 stron.

Pracę otwiera wykaz ważniejszych oznaczeń i akronimów, po którym następuje bardzo ciekawy wstęp, będący swoistym przewodnikiem po całej pracy. Doktorant zawarł w nim syntetyczny opis badań natężenia dźwięku, poczynając od jego teoretycznego sformułowania a na zaproponowanych metodach skończywszy. Ten zabieg bardzo czytelnie pozycjonuje podjęte w rozprawie zagadnienia na tle stanu wiedzy oraz w czytelny sposób określa cel podjętej pracy. We wstępie doktorant sformułował również cele i główne tezy pracy, następnie przedstawiony jest ramowy układ pracy z krótkim opisem zawartości poszczególnych rozdziałów pracy. W ocenie recenzenta, tak zredagowany wstęp doskonale wprowadza czytelnika w temat pracy.

Zaproponowana kolejność poszczególnych rozdziałów oraz ich zawartość jest przemyślana, logiczna i spójna. Taka jest zresztą cała praca. Już w tym miejscu recenzji wyrażam uznanie dla autora i opiekuna dla włożonej pracy. Ogólnie w pracy można wyróżnić dwie zasadnicze części: przeglądową i eksperymentalną. Część przeglądowa obejmuje trzy pierwsze rozdziały i liczy 43 strony.

W rozdziale 1 autor przedstawia podstawowe pojęcia związane z polem akustycznym i falą akustyczną, by dojść do kluczowego pojęcia: natężenia dźwięku. Są to skądinąd informacje dobrze znane lecz w celu łatwego zrozumienia kontekstu podjętych prac ich przedstawienie jest jak najbardziej uzasadnione. W rozdziale 2 autor zawarł syntetyczny przegląd współczesnych metod oraz zastosowań pomiaru natężenia dźwięku. Rozdział ten uważam za cenny i rzetelnie zredagowany. Doktorant zadał sobie dużo trudu, by przejrzeć rozległą literaturę przedmiotu i w sposób uporządkowany przedstawił stan wiedzy w zakresie znanych technik pomiaru natężenia dźwięku. Rozdział ten ułatwia czytelnikowi w zorientowaniu się, jaka jest istota rozwiązania zaproponowanego przez doktoranta. Opis zastosowań technik pomiaru natężenia dźwięku ma znaczenie w kontekście rozważań możliwości i ograniczeń zaproponowanych przez doktoranta rozwiązań i znajdzie swoje odzwierciedlenie w rozdziałach końcowych 8-10. W rozdziale 3 doktorant zawarł opis błędów występujących przy pomiarze natężenia dźwięku za pomocą sondy PP (ciśnienie - ciśnienie) i sposobów ich eliminacji. Zawartość tego rozdziału jest bardzo cenna z punktu widzenia rozważań autora na temat błędów w zaproponowanych przez niego metodach pomiarowych. Treści te dowodzą dużej biegłości autora w podjętej tematyce. Pozwalają utwierdzić się w przekonaniu, że autor dokładnie wie, na czym polega problem. Ponadto treści te stanowią doskonałe wprowadzenie w krytyczną ocenę autorskich metod rozwijanych przez doktoranta.

Część eksperymentalna, zawierająca autorski wkład doktoranta do dziedziny wiedzy, obejmuje rozdziały od 4 do 10, liczące 92 strony. W rozdziale 4 doktorant przedstawił szczegółowy opis zaproponowanych technik pomiaru natężenia dźwięku za pomocą pojedynczego mikrofonu i mechanizmu synchronizacji. W rozdziale tym czytelnik dowiaduje się, jaka jest zasada działania metody z synchronizacją pośrednią, a jaka z synchronizacją

bezpośrednią. Przedstawiono źródła błędów pomiarowych dla metod synchronicznych. Rozdział 5 zawiera zwarty opis elementów technicznych zastosowanych systemów pomiarowych. Oprócz opisu komory bezekhowej, elementów sterujących (komputery, karty pomiarowe) i wykonawczych (manipulator kartezjański), doktorant przedstawia szczegółowy opis obrotowej sondy pomiarowej – kluczowego i pomysłowego elementu będącego źródłem sygnałów pomiarowych. W rozdziale 6 przedstawiono badania eksperymentalne wykonane za pomocą metody z synchronizacją pośrednią. Rozdział 7 zawiera opis badań eksperymentalnych wykonanych za pomocą metody z synchronizacją bezpośrednią. W rozdziale 8 przedstawiono przegląd zastosowań metody z synchronizacją bezpośrednią. W rozdziale 9 autor przedstawił zastosowanie metody z synchronizacją bezpośrednią dla celów obrazowania wektorowych pól akustycznych. Rozdział 10 zawiera podsumowanie i wnioski końcowe.

Tezy rozprawy

Jak wspomniano wyżej autor we wstępie rozprawy sformułował trzy główne tezy rozprawy. Pierwsza dotyczy metody z synchronizacją bezpośrednią. Jej brzmienie jest następujące:

Dzięki zsynchronizowaniu już na etapie pomiaru procesu akwizycji i generacji możliwe jest, na podstawie dokonanych w dyskretnych punktach pomiarów ciśnienia akustycznego, wyznaczenie rozkładu wektorowego pola akustycznego.

Kolejne dwie tezy odnoszą się do metody z synchronizacją pośrednią, oto ich treść:

Proces synchronizacji sygnałów ciśnieniowych zarejestrowanych w kolejnych pozycjach mikrofonu jest możliwy do realizacji zarówno za pomocą czujników ciśnieniowych (mikrofon) jak i przyspieszeniowych (akcelerometr).

Istnieje możliwość skutecznej eliminacji błędu wynikającego ze skończonej rozdzielczości czasowej synchronizacji za pomocą algorytmów numerycznych.

Tezy pracy zostały sformułowane poprawnie, a doktorant w poszczególnych rozdziałach systematycznie i skrupulatnie dowodzi ich słuszności.

Analiza źródeł (w tym literatury światowej i stanu techniki)

Doktorant dokonał szczegółowego i starannego doboru literatury. Spis cytowanej prac liczy 108 pozycji, z czego 102 odnoszą się do książek, artykułów naukowych i referatów konferencyjnych, a 6 do norm, kart katalogowych i dokumentacji technicznej wybranych przyrządów pomiarowych. Wymienione opracowania dotyczą podjętej tematyki i są starannie zacytowane w treści pracy. Autor dokonał rozległego przeglądu stanu wiedzy i techniki w odniesieniu do opisu i pomiaru natężenia dźwięku oraz jego praktycznego zastosowania. Skrupulatnie i umiejętnie łączy fakty oraz tworzy spójną narrację, uzupełniając ją własnym, autorskim wkładem. Pod tym względem praca zasługuje na szczególne uznanie.

Poprawność pracy

Praca jest poprawna pod względem układu poszczególnych rozdziałów oraz zawartych w nich treści. Autor systematycznie i skrupulatnie opisuje podjęte zagadnienie. Przyjęta metodyka badawcza jest szczegółowo wyjaśniona i uzasadniona. Poszczególne eksperymenty badawcze zostały dokładnie przemyślane i starannie zrealizowane. Uzyskane wyniki zostały zaprezentowane w formie licznych tabel i wykresów w sposób nie budzący istotnych zastrzeżeń, a sformułowane na ich podstawie wnioski są trafne i logiczne. Doktorant biegle posługuje się zarówno adekwatnym do podjętych zagadnień, aparatem matematycznym, jak również zróżnicowanym zestawem programów komputerowych i urządzeń pomiarowych. Dowodzi tym samym swojej dojrzałości w zakresie prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

Oryginalne wyniki rozprawy i ich znaczenie dla dyscypliny naukowej

Oryginalny wkład własny autora oraz jego praktyczne znaczenie dla dyscypliny naukowej i techniki są przedstawione głównie w rozdziałach od 4 do 10, należą do nich zaproponowane techniki pomiarowe:

- metoda z synchronizacją pośrednią,
- metoda z synchronizacją bezpośrednią,
- metoda minimalizowania błędu pomiaru w metodzie z synchronizacją pośrednią,
- udokumentowanie praktycznych możliwości opracowanych technik pomiarowych.

A także:

Opracowanie autorskiego systemu pomiarowego obejmującego układy elektroniczne i oprogramowanie sterujące obrotową sondą pomiarową i umożliwiające analizę danych pomiarowych.

Stworzenie autorskiego systemu pomiarowego wektorowego pola akustycznego obejmującego część konstrukcji mechanicznej konstrukcję części elektronicznej oprogramowanie sterownika część oprogramowania komputera przemysłowego zapewniającą synchronizację procesu akwizycji i generacji, oprogramowanie przetwarzające dane pomiarowe i wizualizujące zmierzone pole akustyczne w postaci mapy barwnej i pola strzałek.

Przeprowadzenie badania metody z synchronizacją pośrednią dla szeregu źródeł rzeczywistych o różnych typach generowanego dźwięku oraz różnych mechanizmów synchronizacji pod kątem rozrzutu otrzymanych wyników.

Stworzenie na podstawie wyników pomiarów modelu błędu dla metody z synchronizacją pośrednią wynikającego z charakteru mierzonego sygnału łączącego go ze współczynnikiem SNR mierzonego sygnału. Przeprowadzenie eksperymentu pozwalającego na weryfikację zgodności stworzonego modelu z wynikami pomiarowymi.

Stworzenie i przetestowanie algorytmu umożliwiającego skuteczną minimalizację błędu wynikającego ze skończonej rozdzielczości czasowej procesu synchronizacji, zarówno pod kątem samego błędu jak i nakładu obliczeń.

Przeprowadzenie przy pomocy stworzonego systemu pomiarowego badania rozkładu natężenia dźwięku w pobliżu aktywnego zestawu głośnikowego.

Poziom edycyjny rozprawy

Praca jest napisana bardzo starannie. Zdania są sformułowane poprawnie pod względem stylistycznym. Czyta się ją bardzo przyjemnie. Treści poszczególnych rozdziałów są ze sobą połączone, tworzą spójną całość. Numeracja wzorów, rysunków i tabel jest poprawna. Odwołania do rysunków i tabel znajdują się w tekście pracy. Każdy tego rodzaju obiekt zamieszczony w pracy ma swoje uzasadnienie. Poruszając wiele różnych zagadnień trudno jednak uniknąć pomyłek. Tak jest również w przypadku pracy p. Michała Raczyńskiego.

Poniżej zamieszczono listę uwag krytycznych:

1. Wzór 1.1 strona 19, jest: $p = p' - p_0$, czy nie powinno być $p = p' - p_{atm}$? Byłoby to zgodne z przyjętymi w pracy oznaczeniami, gdzie p to ciśnienie akustyczne, p' – chwilowa wartość ciśnienia, a p_{atm} – ciśnienie statyczne (atmosferyczne), p_0 natomiast to według Autora ciśnienie akustyczne podczas wyznaczania I_0 .
2. Objaśnianie oznaczeń dla wzoru 1.8 strona 20, jest: wykładnik adiabaty (stosunek ciepła właściwego przy stałej objętości do ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu), powinno być (stosunek ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu do ciepła właściwego przy stałej objętości).
3. Sporadycznie zdarzają się zdania z niewłaściwie umiejscowionym przecinkiem, np. str. 34 zdanie: *Przesunięcie, to jest proporcjonalne do prędkości akustycznej cząstki: (...)*.
4. Na stronie 38 autor w zdaniu: W przypadku pomiaru mocy akustycznej należy scałkować wzór (2.1) (...) przywołuje niewłaściwy wzór. Powinno być (2.7). Wzór (2.1) określa przesunięcie fazowe, zaś wzorem (2.7) opisano aktywną składową natężenia dźwięku.
5. Na stronie 39 błędne justowanie numeru wzoru (2.10)
6. Na stronie 41 błędne odwołanie do rysunku, jest rys. 2.16, powinno być rys. 2.11. W pracy nie ma rysunku o numerze 2.16. W tym samym zdaniu obcięte słowo, jest: *przedst*, powinno być: *przedstawienia*.
7. Wątpliwości budzi schemat c) na rysunku 2.12, strona 43. Na wejście dolnego przetwornika A/C podano sygnał oznaczony $p_2(t)$, na wyjściu przetwornika przedstawiony jest sygnał $u(n)$. Można odnieść wrażenie, że blok przetwornika A/C nie

tylko zamienia sygnał ciągły na dyskretny lecz również przekształca wartości ciśnienia akustycznego w wartości prędkości akustycznej.

8. W wzorze 6.1 na stronie 106 korzystnie byłoby dodać oznaczenie wartości bezwzględnej dla wyrażenia pod logarytmem, po prawej stronie równania.
9. W rozdziale 6 doktorant przedstawił wyniki pomiarów natężenia dźwięku metodą z synchronizacją pośrednią w jednostkach $[W/m^2]$, wraz z wartością odchylenia standardowego. Prezentacja wyników została zrealizowana w formie tabel i wykresów, dla różnych typów sygnałów, poczynając od sygnałów harmonicznym typu fala sinusoidalna lub prostokątna, po sygnały rzeczywiste pochodzące od źródeł takich jak: małe urządzenie AGD „blender”, elektronarzędzie – wyrzynarka, silnik indukcyjny. Co do zasady jest to poprawne przedstawienie wyników. W rozdziale 6 doktorant zdefiniował dwie miary błędu pomiaru. Pierwsza miara dotyczy błędu względnego metody synchronicznej z synchronizacją pośrednią, wyrażona miarą procentową oraz decybelową (podrozdział 6.4, równania 6.2 i 6.3). Druga miara dotyczy błędu estymacji kąta natarcia fali akustycznej (podrozdział 6.6, równanie 6.7). W prezentacji wyników eksperymentów jest pewna niekonsekwencja. Ilekroć autor przedstawia własne wyniki badań to natężenie dźwięku wyraża w wartościach bezwzględnych w jednostce W/m^2 , natomiast odwołując się do rozwiązań komercyjnych używa miary decybelowej. Utrudnia to interpretację wyników i bezpośrednie porównanie różnych rozwiązań. Korzystnie byłoby przedstawić wyniki własne również przy wykorzystaniu miary decybelowej dla rezultatów przedstawionych w tabelach 6.1, 6.2 i 7.1, np. jak w tekście w górnej części strony 143.
10. W podrozdziale 6.5 doktorant przedstawia mechanizm minimalizacji błędu synchronizacji z wykorzystaniem dwuetapowej korekcji. Na stronie 123 doktorant podsumowuje wyniki badań metody z synchronizacją pośrednią podkreślając, że błąd został zminimalizowany od kilku do kilkunastu razy. Czy chodzi raczej o minimalizację wartości odchylenia standardowego, czyli w istocie niepewności pomiaru?
11. Przy tej okazji pozwolę sobie na polemikę ze stwierdzeniem zamieszczonym na stronie 123: *Wyjątek stanowiła sytuacja dla pasma 2 kHz i źródła w postaci klaksonu samochodowego, gdzie błąd dla metody synchronicznej zmalał poniżej wartości dla klasycznej metody PP.* Otóż sytuację zbliżoną do opisanej powyżej obserwujemy na rysunku 6.5.13, z tym, że na rysunku tym przedstawiono zmianę wartości odchylenia standardowego w funkcji parametru OS, czyli rozrzutu zmierzonych wartości, nie zaś wartość błędu.
12. Słaba jakość rysunków 7.4 i 7.5 na stronie 139.
13. Nieczytelny schemat b) na rysunku 8.1 na stronie 141.
14. Nie odnaleziono w tekście pracy odnośnika do pozycji bibliograficznej nr 53.

Podsumowanie mocnych i słabych stron rozprawy

Do mocnych stron przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej należy zaliczyć w pierwszej kolejności udowodnienie tez postawionych w rozprawie, a w konsekwencji udokumentowanie przydatności i użyteczności opracowanych technik pomiaru natężenia dźwięku za pomocą pojedynczego mikrofonu. Mocną stroną pracy są również rozdziały przeglądowe, wprowadzające w tematykę rozprawy, napisane zrozumiałym i zwięzłym językiem. Szczegółowe przedstawienie scenariuszy pomiarowych wykorzystujących w pełni potencjał opracowanych metod jest również zaletą tej pracy. Korzystną i pożądaną cechą rozprawy doktorskiej jest konsekwentne trzymanie się tematu pracy, bez zbędnych dygresji i rozproszenia wątków badawczych.

Do słabych stron rozprawy należą nieliczne błędy edycyjne oraz częściowo rozproszone wyniki błędów pomiarowych. Nie umniejszają one jednak pozytywnej oceny całej pracy.

Końcowe wnioski recenzji

Zaproponowane metody pomiarowe są bardzo pomysłowe i zasadniczo odmienne od powszechnie stosowanych technik wyznaczania natężenia dźwięku. Zastosowanie jednego mikrofonu dla celów pomiaru natężenia dźwięku rozwiązuje istotny problem spotykany w konstrukcji klasycznych sond natężeniowych typu pp, a mianowicie konieczność doboru mikrofonów o zbliżonych charakterystykach, szczególnie fazowych oraz potrzebę stosowania skomplikowanych procedur kalibracyjnych. Autor szczegółowo rozważa konsekwencje zaproponowanego podejścia w odniesieniu do możliwych źródeł błędów pomiarowych. Dyskusję dotyczącą tego zagadnienia przedstawioną w rozprawie doktorskiej uważam za szczególnie wartościową z naukowego punktu widzenia. Dowodzi to, że autor doskonale orientuje się w istocie rozważanych technik pomiarowych. Jest świadomy możliwości i ograniczeń poszczególnych sposobów wyznaczania natężenia dźwięku.

Podsumowując uwagi i opinie przedstawione w niniejszej recenzji stwierdzam, że przygotowana przez pana Michała Raczyńskiego rozprawa doktorska spełnia wymagania określone w art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz 595 z późniejszymi zmianami), wnoszę o przyjęcie w/w rozprawy doktorskiej i jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Ko tus