

dr hab. inż. Witold Mickiewicz, prof. ZUT
Katedra Inżynierii Sygnałów, Systemów i Elektroniki
Wydział Elektryczny
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
70-310 Szczecin, Al. Piastów 17
witold.mickiewicz@zut.edu.pl

Szczecin, 07.03.2025

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Tomasza Nowaka

pt.

Kształtowanie frontu fali za pomocą soczewek akustycznych

Problem badawczy objęty zakresem rozprawy

Mimo dynamicznego rozwoju technologii przyczyniającego się do stałego podwyższania jakości transmisji sygnałów akustycznych z wykorzystaniem torów elektroakustycznych, najwięcej problemów ciągle stwarzają elementy skrajne tego toru, czyli przetworniki energii akustycznej na elektryczną – mikrofony oraz przetworniki energii elektrycznej na akustyczną – głośniki. Użytkownik końcowy oczekuje, aby obcowanie z sygnałem akustycznym transmitowanym na odległość było jak najbardziej tożsame z oryginałem (nawet ograniczając się tylko do wybranych kluczowych cech, tj. barwa dźwięku, przestrzenność czy choćby tylko zrozumiałość) i to bez ograniczeń związanych np. z lokalizacją słuchacza względem urządzeń głośnikowych. W przypadku nagłaśniania dużych powierzchni ważne poza samą jakością stają się aspekty ekonomiczno-formalne. Atrakcyjniejsze pod względem ekonomicznym będzie zastosowanie mniejszej liczby urządzeń głośnikowych gwarantujących tę samą jakość i równomierność nagłośnienia określonej powierzchni.

Problem badawczy, jakiego dotyczy praca mgra inż. Tomasza Nowaka, polega na poszukiwaniu rozwiązania technicznego i sprawdzeniu na drodze symulacyjno-pomiarowej, w jaki sposób zastosowanie obiektu pośredniczącego między elementem drgającym przetwornika izodynamicznego a otoczeniem w postaci tzw. soczewki akustycznej umożliwi kształtowanie tych parametrów charakteryzujących tak zmodyfikowany układ akustyczny, że właściwości użytkowe nowego układu przetwornika poprawią się. Istotne jest również, że w swoich badaniach nad konstrukcją soczewki akustycznej Autor rozprawy umiał wykorzystać możliwości nowoczesnej technologii druku 3D, która rewolucjonizuje proces szybkiego prototypowania nowych rozwiązań tego typu oraz umożliwia sprawdzenie efektów optymalizacji opartej na modelu teoretycznym w praktyce.

Tematyka rozprawy dotyczy zatem zagadnień związanych z systemami elektroakustycznymi, budową przetworników energii elektrycznej na akustyczną oraz sterowaniem emisją fali akustycznej, a więc mieści się w sferze zainteresowań dyscypliny naukowej automatyka,

elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Praca ma charakter eksperymentalny. Uważam, że podjęta w pracy problematyka badawcza jest aktualna i wartościowa zarówno w aspekcie teoretycznym jak i praktycznym.

Ocena organizacji rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska składa się z 7 rozdziałów numerowanych (w tym rozdział 1. Wprowadzenie oraz rozdział 7. Zakończenie), podziękowań, krótkich streszczeń w języku polskim i angielskim, wykazu akronimów i oznaczeń oraz spisu literatury. Główny tekst pracy liczy 66 stron. Praca została napisana w języku polskim.

Pracę otwierają podziękowania, streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz akronimów i oznaczeń, po którym następuje ciekawy wstęp (rozdział 1). Doktorant zawarł w nim bardzo syntetyczny opis stanu technologii związanej ze sterowaniem kształtem frontu falowego za pomocą soczewek akustycznych, dzięki czemu jasno zobrazował miejsce podjętych w rozprawie zagadnień na tle stanu wiedzy oraz w czytelny sposób określił cel podjętej pracy. We wstępie Doktorant sformułował również tezę pracy, następnie przedstawił pokrótce zawartość poszczególnych rozdziałów. W mojej opinii, tak zredagowany wstęp dobrze wprowadza czytelnika w dyskutowane w dalszej części zagadnienia.

Zaproponowana kolejność poszczególnych rozdziałów oraz ich zawartość jest przemyślana, logiczna i spójna. Ogólnie w pracy można wyróżnić trzy zasadnicze części: koncepcyjną, symulacyjną i pomiarową. Część koncepcyjna to rozdział 2, który liczy 6 stron. Zaprezentowano tu zasadę działania i konstrukcję proponowanej soczewki akustycznej. Podano proste zależności geometryczne, które mogą być wykorzystane do projektowania układu. Część symulacyjna obejmuje rozdziały 3 i 4 liczące 15 stron. W rozdziale 3 Doktorant przedstawił proces przygotowania symulacji z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Zaprezentował stworzony model 3D obiektu oraz przestrzeni symulacyjnej. Opisał interfejs fizyczny oraz metodę obliczeniową. Z kolei w rozdziale 4 Autor zaprezentował w postaci graficznej wyniki przeprowadzonych symulacji wraz z opisem i wstępnymi wnioskami. Część pomiarowa obejmuje rozdziały 5 i 6. Opis liczy 32 strony. W rozdziale 5 zaprezentowano proces wydruku prototypu z wykorzystaniem drukarki 3D pracującej w technologii mSLA (masked stereolithography apparatus). Opisano przygotowanie i kalibrację systemu pomiarowego oraz sprawdzenie ewentualnego wpływu warunków pomiarowych na wyniki. Pomiary polegały na rejestracji odpowiedzi impulsowych przez mikrofon ciśnieniowy umieszczony w szeregu pozycji, kiedy sygnał pomiarowy emitowany był przez przetwornik zainstalowany w odgrodzie z założoną lub bez soczewki. W rozdziale 6. zaprezentowano wyniki pomiarów w postaci przetworzonej umożliwiającej porównanie z wynikami symulacji.

W rozdziale 7 Doktorant podsumował całą pracę i przedstawił wnioski z przeprowadzonych symulacji i pomiarów. Na tej podstawie uznał, że postawiona teza została udowodniona. W dalszej części Autor przedstawił zastosowania praktyczne oraz ocenę działania opracowanego rozwiązania. Wytyczył również perspektywy dalszych badań.

Reasumując tę część recenzji mogę stwierdzić, że rozprawa została zorganizowana w sposób prawidłowy niebudzący zastrzeżeń.

Teza rozprawy

Autor sformułował cel naukowy rozprawy jako dowiedzenie prawdziwości następującej tezy: **„Jest możliwe stworzenie soczewki akustycznej pozwalającej na regulację krzywizn czoła fali w dwóch płaszczyznach, dla dowolnego kształtu źródła.”**

W celu jej udowodnienia posłużono się metodami symulacyjno-pomiarowymi stosowanymi w obszarze badania przetworników elektroakustycznych.

Uważam, że problem naukowy (teza) został trafnie i jasno sformułowany, choć w kontekście przeprowadzonych badań z wykorzystaniem tylko jednego rodzaju (kształtu) źródła zastrzeżenie może budzić mowa w tezie o kształcie dowolnym.

Analiza źródeł (w tym literatury światowej i stanu techniki)

Doktorant dokonał moim zdaniem dość ograniczonego doboru literatury. Spis cytowany prac liczy zaledwie 24 pozycje, z czego tylko 8 pozycji jest nie starszych niż 10 lat. Spis zawiera odniesienia do 3 książek, 2 norm, 1 patentu, 17 artykułów naukowych i referatów konferencyjnych oraz 1 strony internetowej z informacjami dotyczącymi wykorzystywanego oprogramowania FEM. Wymienione w spisie opracowania dotyczą podjętej tematyki badawczej i są zacytowane w treści pracy. Niemniej jednak Autor zbyt wąsko skupił się na analizie literatury, która dotyczyła praktycznie wyłącznie rozwiązań podobnych do prezentowanego. Szkoda, że nie odniósł się szerzej np. do innych metod, które stosuje się w celu kształtowania frontu falowego, a o których pisał w pracy. Faktem jest, że do roku 2007 załatwia to pozycja [9], ale czas szybko leci...

Poprawność pracy

Praca jest poprawna pod względem układu poszczególnych rozdziałów oraz zawartych w nich treści. Autor systematycznie i dość dokładnie opisuje podjęte zagadnienie. Przyjęta metodyka badawcza jest poprawna i powszechnie stosowana w pracach naukowych tego typu. Jednak w części eksperymentalnej zabrakło szczegółów technicznych dotyczących parametrów sygnału pomiarowego. Poza tym poszczególne eksperymenty badawcze zostały dokładnie przemyślane i zrealizowane. Uzyskane wyniki zostały zaprezentowane w formie 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 oraz urządzeń do druku 3D. 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 nauki i techniki jest widoczny głównie w rozdziałach od 3 do 6. Do oryginalnych wyników rozprawy o istotnym znaczeniu dla dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne należą szczególnie następujące osiągnięcia:

- zaproponowanie ogólnej metody projektowania akustycznych soczewek rozpraszających w oparciu o pojęcie macierzy wejściowej i wyjściowej oraz współczynników skalowania;
- skonstruowanie i zbadanie soczewki akustycznej poprawiającej wybrane właściwości zastosowanego przetwornika jako źródła dźwięku, w tym:
 - przygotowanie modelu i eksperymentów numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych badanego obiektu;
 - realizacja fizyczna obiektu modelowanego wcześniej numerycznie z wykorzystaniem nowoczesnej technologii druku 3D;
 - przygotowanie i przeprowadzenie pomiarów badanego urządzenia z zastosowaniem aktualnych metod pomiarowych;
- analiza otrzymanych wyników pod kątem zgodności numerycznych badań modelowych i eksperymentu pomiarowego;
- obiektywna analiza niezgodności wyników modelowania numerycznego i pomiarów rzeczywistych oraz wytyczenie na tej podstawie dróg dalszych badań.

W podsumowaniu odniesiono się też do możliwych kierunków rozwoju przeprowadzonych przez Autora badań. Doktorant stwierdza, że przedstawiona metodologia badań może stać się punktem wyjścia do bardziej szczegółowych analiz numerycznych z wykorzystaniem lepszej infrastruktury informatycznej. Umożliwi to przykładowo analizę zjawisk dyssypacyjnych oraz nieliniowych. Ponadto, można również zbadać możliwości tworzenia soczewek unifikujących emisję akustyczną przez kilka przetworników.

Poziom edycyjny rozprawy

Praca napisana jest językiem profesjonalisty, dla którego pewne kwestie są oczywiste i stąd uważa, że w tekście pracy można je pominąć. Autor czasami prowadzi kilkuzdaniowe wywody (szczególnie, gdy porównuje wyniki) i lubi pod koniec stosować zaimki i liczebniki, które zaciemniają wywód i powodują, że czytelnik musi zaczynać ogarniać myśl od początku. Niestety powoduje to, że mimo braku błędów logicznych, pracę czyta się czasami dość trudno. Niemniej mogę stwierdzić, że treści poszczególnych rozdziałów łączą się ze sobą i tworzą spójną całość, numeracja wzorów, rysunków i tabel jest na ogół poprawna. Rysunki wykonane są starannie. Odwołania do rysunków i tabel znajdują się w tekście pracy. Każdy tego rodzaju obiekt zamieszczony w pracy ma swoje uzasadnienie.

Czytając pracę znalazłem kilka niedociągnięć edycyjnych, nasunęło mi się co najmniej kilka uwag formalnych oraz ogólniejszych uwag natury dyskusyjnej. Myślę, że niektóre z nich dadzą przyczynek do twórczej dyskusji naukowej. Oto one:

1. str. 6 – słowo macierz stosowane jest w wielu kontekstach. Moim zdaniem na początku pracy należałoby dokładniej opisać o jaką macierz chodzi.
2. str. 6 – użyto niefortunnego moim zdaniem oznaczenia grubości soczewki literą t , pewnie od *thickness*, ale kojarzącą się powszechnie z czasem.
3. str. 6 – brak dokładniejszego wytłumaczenia, dlaczego przyjęto tutaj grubość 20 mm. Ostatecznie badany obiekt miał grubość 15 mm – to też pozostawiono bez komentarza. Proszę o niego.
4. str. 12 – brak dokładniejszego wyjaśnienia, czym miałyby być matryca wielu soczewek;
5. str. 13 – brak dokładniejszego komentarza dotyczącego rzeczywistego kształtu poszczególnych kanałów w modelu soczewki, szczególnie w kontekście wzoru 2.1;
6. str. 14 – brak źródła literaturowego przy wzorze 3.1;
7. str. 14 – mowa o przetworniku izodynamicznym generującym płaskie czoło fali. Ale brak rozważań, w jakim zakresie przestrzennym w stosunku do jego wielkości można uznać, że generowana fala jest falą płaską.
8. str. 15, pkt. 3.2 – Proszę o wyjaśnienie, dlaczego przyjęto takie a nie inne wartości współczynników skalowania.
9. str. 15, pkt. 3.3 – Nierozumiałe zdanie: „Kanały łączące komórki wejściowe z wyjściowymi zostały zamodelowane za pomocą krzywych parametrycznych jako wytycznych, z końcami prostopadłymi do powierzchni tych komórek.” O jakie wytyczne chodzi?
10. str. 18, pkt. 3.7. – solver czy solwer?
11. str. 30, pkt. 5.2. Brak pełnych informacji o rodzaju i parametrach użytego sygnału pomiarowego oraz o metodach przetwarzania sygnału, jakich użyto do wyznaczania wynikowych odpowiedzi impulsowych na podstawie zarejestrowanych danych. Ponadto proszę o podanie informacji, jakiego użyto oprogramowania rejestrującego, ile było powtórzeń, jaki był poziom szumów otoczenia i dynamika uzyskanych odpowiedzi? Zdanie typu „Napięcie sygnału pomiarowego na zaciskach przetwornika wynosiło 2 V...” niczego nie wyjaśnia. Było to 2 V napięcia stałego, wartość skuteczna, a może międzyszczytowa, sinesweep, MLS?
12. str. 33, rys. 5.6 – na zdjęciu mikrofon pomiarowy ma osłonę przeciwwietrzną. Dlaczego jej użyto, czy to nie miało wpływu na wyniki szczególnie w zakresie wysokich częstotliwości?
13. str. 36, pkt. 6.1 – Píše Pan tu o zależnościach dla źródła punkowego. Proszę wyjaśnić, czy i dlaczego takie założenia są poprawne w przypadku zakresu badanych częstotliwości i wielkości użytego źródła o wylocie prostokątnym, który, jak Pan wcześniej wspomina, generuje płaskie czoło fali.
14. str. 36, pkt. 6.1 – Proszę o podanie konkretnego położenia punktów pomiarowych podczas badań. Nie można tego konkretnie wywnioskować ani z tekstu, ani ze skal na rysunkach. Dlaczego nie zdecydowano się na ich większą ilość, szczególnie w zakresach gdzie charakterystyki ulegają silnym zmianom (np. na rys. 6.1).
15. rys. 6.1 – 6.13 – Czy wykresy powstały na drodze interpolacji danych pomiarowych, czy aproksymacji?
16. str. 38 – w tekście mowa o tabeli 5, a chyba powinna być 6.1.

Podsumowanie mocnych i słabych stron rozprawy

Do mocnych stron przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej należy zaliczyć w pierwszej kolejności udowodnienie tezy postawionej w rozprawie poprzez poprawne wykonanie eksperymentu numerycznego oraz pomiarowego wraz z krytycznym porównaniem wyników, a w konsekwencji potwierdzenie z użyciem badań symulacyjnych i praktycznych pomiarów użyteczności zaproponowanego przez siebie sposobu konstruowania soczewek akustycznych. Mocną stroną pracy jest również wykazana umiejętność tworzenia prototypów modyfikatorów akustycznych z wykorzystaniem nowoczesnej technologii druku 3D.

Do słabych stron rozprawy należy dość skromny przegląd literaturowy, co skutkuje pewnym zachwianiem proporcji między rozważaniami teoretycznymi a częścią eksperymentalną. Czasami styl języka rozprawy mógłby być bardziej dopracowany. Brakuje też pewnych obiektywnych informacji o sposobie prowadzenia pomiarów. Zastrzeżenia te nie zmieniają jednak ogólnie pozytywnej oceny merytorycznej wartości całej pracy.

Końcowe wnioski recenzji

Z praktycznego punktu widzenia zaproponowana i przebadana przez Doktoranta konstrukcja soczewki akustycznej ma szansę wpłynąć na poprawę parametrów użytkowych konstruowanych współcześnie urządzeń głośnikowych. Z metodologicznego punktu praca pokazuje, że zastosowanie w badaniach naukowych technik szybkiego prototypowania umożliwia pomiarową walidację modeli symulacyjnych i prowadzić może do dalszego wzrostu zbieżności obliczeń numerycznych z rzeczywistością dzięki uszczegóławianiu modeli obiektów rzeczywistych tylko w takim zakresie, aby z jednej strony rozszerzyć ich stosowność a z drugiej nie powodować niekoniecznego wzrostu złożoności obliczeń. Dyskusję dotyczącą zbieżności wyników symulacji z pomiarami przedstawioną w rozprawie doktorskiej uważam za wartościową z naukowego punktu widzenia. Dowodzi ona, że Autor dobrze orientuje się w istocie problemów związanych z generowaniem i rozprzestrzenianiem się fal akustycznych w otoczeniu rzeczywistych źródeł dźwięku i jest świadomy możliwości i ograniczeń poszczególnych sposobów kreowania ich właściwości kierunkowych.

Podsumowując uwagi i opinie przedstawione w niniejszej recenzji stwierdzam, że przygotowana przez pana mgr inż. Tomasza Nowaka rozprawa doktorska spełnia wymagania określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2023, poz. 742 z późniejszymi zmianami) oraz wnoszę o przyjęcie w/w rozprawy doktorskiej i jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Witold Michniewicz